

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Comportement des conducteurs face à un changement de limite de vitesse, aux caractéristiques de la route et aux dépassements de cyclistes

CATHERINE TOULOUSE

Département des génies civil, géologique et des mines

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie civil

Septembre 2019

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Comportement des conducteurs face à un changement de limite de vitesse, aux caractéristiques de la route et aux dépassements de cyclistes

présenté par **Catherine TOULOUSE**

en vue de l'obtention du diplôme de Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Owen Waygood, président

Nicolas Saunier, membre et directeur de recherche

Marie-Soleil Cloutier, membre et codirectrice de recherche

Stéphane Blais, membre externe

REMERCIEMENTS

Avant tout, je souhaite adresser mes sincères remerciements à mon directeur de recherche, Nicolas Saunier, et à ma codirectrice de recherche, Marie-Soleil Cloutier, pour leur disponibilité, leur patience, leur expertise et leurs judicieux conseils. Un énorme merci pour m’avoir accompagnée et encadrée tout au long de ce projet.

Je désire également remercier Gaëtan Dussault de m’avoir aidée avec les bases de données et mon collègue, Lionel Nébot-Janvier, de m’avoir aidée avec le langage Python et l’application de *Traffic Intelligence*. Je souhaite exprimer ma reconnaissance à Marie-Hélène Roch et Mojgan Rafiei pour m’avoir accompagnée lors des collectes de données au terrain. Votre aide m’a été très précieuse.

Pour finir, je tiens à exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet. Un merci tout particulier à ma famille et à mes amis pour leur soutien et leur encouragement.

RÉSUMÉ

Il est connu que l'augmentation de la vitesse pratiquée augmente le risque de collision et la sévérité de ces collisions. La vitesse est l'une des principales causes de mortalité sur les routes du Québec. Ce fâcheux constat amène le gouvernement et les municipalités à modifier les limites de vitesse afin de rendre les déplacements routiers plus sécuritaires. Malheureusement, l'implantation d'une nouvelle limite de vitesse, sans modification à la configuration de la route, n'a pas toujours l'effet escompté. Pour changer le comportement des conducteurs, il faut, tout d'abord, comprendre pourquoi ils excèdent les limites de vitesse et, ensuite, identifier les facteurs qui affectent leur vitesse adoptée. Le comportement des conducteurs est affecté par de nombreux facteurs tels que les caractéristiques de la route, l'environnement routier et les conditions climatiques.

Cette étude évalue le comportement des conducteurs avant et après un changement de limite de vitesse et propose des modèles statistiques pour prédire leur comportement en fonction de certaines caractéristiques géométriques de la route et de l'environnement routier. Également, l'étude évalue le comportement des conducteurs de véhicules motorisés en présence de cyclistes et mesure les distances de dépassement des cyclistes. Pour faire cette dernière évaluation, une technique de vision par ordinateur est employée pour collecter, traiter et analyser des données vidéo de trafic dans des situations de dépassement.

Selon les résultats, le différentiel des limites de vitesse n'est pas proportionnel au différentiel des vitesses pratiquées moyennes. En effet, une diminution de 10 km/h des vitesses affichées entraîne une diminution de 2,5 km/h des vitesses moyennes pratiquées et une diminution de 3,2 km/h des 85^e centiles des vitesses pratiquées. Également, ces diminutions des vitesses affichées occasionnent une hausse de 25,2 % des contrevenants (conducteurs qui excèdent les limites de vitesse). Les modèles prédictifs ont permis de cibler des caractéristiques influençant le comportement des conducteurs. Selon ces modèles, un effet de rétrécissement des voies de circulation affecte positivement le choix des vitesses pratiquées. Par exemple, la présence d'un terre-plein latéral diminue de 8 km/h les vitesses pratiquées après le changement de limite de vitesse. En revanche, lorsque les conducteurs ont plus d'espace pour circuler, tel que la présence d'une zone de dépassement, ils ont tendance à conduire plus rapidement. Également, plus la chaussée est large, plus le ratio des vitesses est élevé, ce qui veut dire l'excès des limites de vitesse est plus important.

La présence de cyclistes ne semble pas affecter le comportement des conducteurs, puisqu'aucune baisse significative des vitesses pratiquées lors des dépassements des cyclistes n'est observée pour le site à l'étude. Cependant, dans 97 % des situations de dépassement observées, les conducteurs ont respecté la distance minimale prescrite d'un mètre entre leur véhicule et le cycliste.

ABSTRACT

It is known that increasing driving speed increases the risk of collision and the severity of road collisions. Speed is one of the main causes of death on Quebec's roads. This finding leads the government and cities to change speed limits to make road travel safer. Unfortunately, the implementation of a new speed limit, without modification to the road configuration, does not always have the desired effect. To change driver behaviour, we must first understand why they exceed speed limits and then identify the factors that affect their speed. Driver behaviour is affected by many factors such as road characteristics, road environment and weather conditions.

This study evaluates the behaviour of drivers before and after a speed limit change and proposes statistical models to predict their behaviour according to some geometric characteristics of the road and characteristics of the road environment. Also, the study evaluates the behaviour of motor vehicle drivers in the presence of cyclists and measures the passing distances between the vehicles and the bicycle riders. To make this last evaluation, a computer vision technique is employed to collect, process and analyze traffic video data in overtaking situations.

According to the results, the differential of the speed limits is not proportional to the differential of the average of driving speeds. Indeed, a decrease of 10 km/h of the posted speeds results in a decrease of 2.5 km/h of the average speeds practiced and a reduction of 3.2 km/h of the 85th percentiles of the speeds practiced. Also, these decreases in posted speeds cause a 25.2 % increase in offenders (drivers who exceed speed limits). Predictive models have identified features that influence driver behaviour. According to these models, a narrowing effect of the traffic lanes positively affects the choice of the driving speeds. For example, the presence of a lateral median reduces speeds by 8 km/h after the change of speed limit. On the other hand, when drivers have more space to circulate, such as the presence of an overtaking area, they tend to drive faster. Also, the wider the lane is, the higher the speed ratio would be, which means that the excess speed limits are higher.

The presence of cyclists does not seem to affect the driver behaviour, since no significant decrease in the driving speeds during the overtaking of the cyclists is observed for the studied sites. However, in 97 % of the overtaking situations observed, the drivers respected the minimum distance of one meter between their vehicle and the cyclist.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES FIGURES.....	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XVI
LISTE DES ANNEXES.....	XVII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Problématique.....	1
1.2 Objectifs de la recherche	2
1.3 Structure du mémoire	3
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	5
2.1 Relation entre les vitesses pratiquées et les collisions	5
2.1.1 Sévérité des collisions	5
2.1.2 Risque de collision	6
2.2 Effets d'un changement de la limite prescrite sur le risque de collision et les vitesses pratiquées	10
2.2.1 En Amérique	10
2.2.2 En Europe	12
2.2.3 En Asie	14
2.2.4 En Océanie	15
2.2.5 Résumé.....	16

2.3	Effets des caractéristiques de la route et de l'environnement routier sur le comportement des conducteurs	16
2.3.1	Crédibilité des limites de vitesse	17
2.3.2	Caractéristiques géométriques de la route.....	18
2.3.3	Environnement routier.....	25
2.3.4	Autres caractéristiques	27
2.4	Méthodes de collecte des données de vitesse temporaires pour les véhicules motorisés	29
2.4.1	Méthode manuelle	29
2.4.2	Tubes pneumatiques	29
2.4.3	Pistolet laser (pistolet lidar).....	30
2.4.4	Capteur radar	30
2.4.5	Capteur à infrarouge (actif et passif).....	30
2.4.6	Capteur acoustique (actif et passif)	31
2.4.7	Caméra vidéo.....	32
2.5	Système de détection et suivi des objets par images vidéo	32
2.5.1	Applications à la circulation motorisée	33
2.5.2	Applications à la circulation non motorisée	34
2.6	Vue d'ensemble sur la sécurité des cyclistes en route partagée	35
2.6.1	Méthodes d'évaluation de la sécurité	36
2.6.2	Facteurs de risque dans les collisions impliquant les cyclistes	37
CHAPITRE 3 CHANGEMENT DE LIMITES DE VITESSE ET CARACTÉRISTIQUES DE LA ROUTE		39
3.1	Méthodologie	40
3.1.1	Inventaire de la base de données spatiale.....	40

3.1.2	Critères de sélection des sites.....	42
3.1.3	Procédure de collecte des données	45
3.1.4	Traitement et filtrage des données de vitesse.....	52
3.1.5	Méthode d'analyse	56
3.2	Présentation des sites.....	60
3.2.1	Groupe cas-1	60
3.2.2	Groupe cas-2	60
3.2.3	Groupe témoin.....	61
3.2.4	Comparaison des groupes.....	62
3.3	Résultats et analyse des données	63
3.3.1	Évaluation des vitesses pratiquées dans le temps.....	64
3.3.2	Évaluation des différentiels dans les vitesses pratiquées	66
3.3.3	Proportion d'excès de la limite de vitesse.....	70
3.3.4	Modèles des vitesses pratiquées pour le groupe cas-1	71
3.3.5	Analyses descriptives du groupe cas-2.....	80
3.4	Synthèse des résultats.....	86
CHAPITRE 4	DÉPASSEMENTS DES CYCLISTES	91
4.1	Système de traitement d'images vidéo.....	91
4.1.1	Vue d'ensemble du système.....	92
4.1.2	Procédure de collecte de données et équipement	93
4.1.3	Calibration de la caméra.....	95
4.1.4	Détection et suivi des usagers	97
4.1.5	Classification des usagers.....	100
4.1.6	Méthode de comparaison automatique des mesures de la vitesse.....	102

4.1.7	Méthode de mesure automatique de la distance de dépassement.....	104
4.2	Évaluation du système.....	107
4.2.1	Détection, suivi et classification des usagers de la route	107
4.2.2	Mesure de la vitesse	109
4.2.3	Mesure de la distance de dépassement.....	111
4.2.4	Classes de distance de dépassement.....	113
4.2.5	Détection des dépassements	114
4.3	Résultats et analyse des données	115
4.3.1	Vitesse de dépassement	115
4.3.2	Distance de dépassement.....	119
4.4	Synthèse des résultats.....	121
CHAPITRE 5	CONCLUSION	123
RÉFÉRENCES	.....	129
ANNEXES	.....	139

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Adaptation du Power Model par Elvik, Rune et al. (2004).....	10
Tableau 3.1 : Liste des couches de données géospatiales utilisées	41
Tableau 3.2 : Exemple de fichier de données de vitesse du MTQ	53
Tableau 3.3: Comparaison des caractéristiques des 3 groupes selon le pourcentage par catégorie	63
Tableau 3.4 : Évaluation des différentiels des vitesses pratiquées moyennes et des vitesses au 85 ^e centile des sites cas.....	66
Tableau 3.5 : Modèle de régression linéaire de la vitesse moyenne pratiquée après le changement au niveau des sites	74
Tableau 3.6 : Valeur de b de l'équation réduite du modèle des vitesses pratiquées après le changement au niveau des sites.....	76
Tableau 3.7 : Modèle de régression linéaire du différentiel des ratios de vitesses au niveau des sites	77
Tableau 3.8 : Variation attendue du ratio des vitesses selon le modèle	77
Tableau 3.9 : Modèles de régression linéaire du pourcentage de contrevenants et du ratio des vitesses au niveau des sites-relevés	79
Tableau 3.10 : Répartition des caractéristiques des 16 sites restants du groupe cas-2	81
Tableau 3.11 : Ratio des vitesses en fonction des caractéristiques de la route avant et après le changement de limite de vitesse.....	83
Tableau 3.12 : Résumés de l'effet du changement de limite de vitesse sur les vitesses moyennes pratiquées	87
Tableau 3.13 : Résumés de l'effet du changement de limite de vitesse sur les 85 ^e centiles des vitesses pratiquées	88
Tableau 4.1 : Erreurs sur la mesure de la vitesse des véhicules (erreur relative, erreur absolue) par rapport aux tubes pneumatiques	110

Tableau 4.2 : Erreurs sur la mesure de la distance de dépassement (erreur relative, erreur absolue) par rapport à la mesure manuelle	112
Tableau 4.3 : Vitesse moyenne et écart-type des véhicules (entre parenthèses), avant, pendant et après le dépassement des cyclistes, ainsi que l'effet sur les vitesses	116
Tableau 4.4 : Répartition des dépassements selon la distance de dépassement et la direction	120
Tableau B.1 : Présentation des sites du groupe cas-1 (changement de vitesse entre 2006 et 2013)	142
Tableau B.2 : Présentation des sites du groupe cas-2 (changement de vitesse entre 2013 et 2017)	145
Tableau B.3 : Présentation des sites du groupe témoin (sans changement de limite de vitesse) .	146
Tableau C.1 : Différentiels des vitesses moyennes pratiquées et des 85 ^e centiles des vitesses pour groupe cas-1	148
Tableau C.2 : Différentiels dans les vitesses pratiquées moyennes et des 85 ^e centiles des vitesses pour le groupe cas-2	151
Tableau C.3 : Vitesses pratiquées moyennes et 85 ^e centiles des vitesses pour le groupe témoin	152
Tableau D.1 : Caractéristiques des sites du groupe cas-1	154

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Types de courbes verticales	23
Figure 2.2 : Vue tridimensionnelle des combinaisons des courbes horizontales et verticales	24
Figure 2.3 : Indices du taux de collisions (ratio du taux de collisions sur le taux de collisions à 10 points d'accès) selon le nombre de points d'accès (Gluck et al., 1999)	26
Figure 3.1 : Facteurs affectant le choix de la vitesse pratiquée du conducteur	39
Figure 3.2: Installation des tubes pneumatiques	45
Figure 3.3: Équipements de Counting Cars	47
Figure 3.4: Capteur WayCount	47
Figure 3.5: Exemple de dégagement visuel latéral en milieu boisé (site 18).....	50
Figure 3.6: Exemple de dégagement visuel latéral en milieu résidentiel (site 10).....	50
Figure 3.7: Exemple de mesure du dégagement visuel latéral (site 8).....	51
Figure 3.8 : Représentation des critères 1 et 2 sur une ligne du temps	55
Figure 3.9 : Exemple d'application du critère 3 sur les relevés de vitesse du site cas 218	55
Figure 3.10 : Exemple d'application du critère 4 sur les relevés de vitesse du site témoin 302	56
Figure 3.11 : Localisation des sites à l'étude du groupe cas-1 (n = 60)	60
Figure 3.12 : Localisation des sites à l'étude du groupe cas-2 (n = 20)	61
Figure 3.13 : Localisation des sites à l'étude du groupe témoin (n = 43)	62
Figure 3.14 : Ratio des vitesses en fonction du temps pour les groupes cas-1 et cas-2	64
Figure 3.15 : Ratio des vitesses en fonction du temps pour le groupe témoin.....	65
Figure 3.16 : Différentiel des vitesses pratiquées moyennes par site selon le différentiel des limites de vitesse	68
Figure 3.17 : Différentiel des 85e centiles des vitesses par site selon le différentiel des limites de vitesse	69

Figure 3.18 : Variation du pourcentage de contrevenants selon les limites de vitesse avant et après le changement.....	71
Figure 3.19 : Vitesse moyenne prédite selon la vitesse moyenne réelle du modèle des vitesses pratiquées après le changement au niveau des sites	75
Figure 3.20 : Matrice de corrélation linéaire des caractéristiques du groupe cas-2	82
Figure 4.1 : Projection des points de l'image dans l'espace monde (Sochor et al., 2018).....	97
Figure 4.2 : Exemple de suivi des points d'intérêt	98
Figure 4.3 : Exemple du regroupement des points d'intérêt.....	99
Figure 4.4 : Schéma de la base de données	100
Figure 4.5 : Profils des vitesses des classes d'utilisateurs de la route	101
Figure 4.6 : Exemple de la variation de la vitesse d'une voiture dans le temps (taux à 30 IPS) ..	102
Figure 4.7 : Zone d'intérêt de la mesure comparative de la vitesse des objets par le système	103
Figure 4.8 : Exemple de trajectoires et de positions des points d'intérêt à un instant dans le système de coordonnées du monde	104
Figure 4.9 : Schéma de la position la plus proche de la caméra	105
Figure 4.10 : Projection dans un système de coordonnées curvilignes	106
Figure 4.11 : Exemple de distances de dépassement à partir de la distance de la ligne centrale (position latérale) en direction ouest	107
Figure 4.12 : Causes principales des erreurs de classification en direction ouest (image de gauche) et en direction est (image de droite)	108
Figure 4.13 : Comparaison des mesures de vitesse de l'outil et des tubes pneumatiques	109
Figure 4.14 : Comparaison des distances de dépassement automatique et réelle	111
Figure 4.15 : Matrice de confusion (à gauche) et comparaison des distances de dépassement (à droite) pour les deux directions combinées.....	114
Figure 4.16 : Différentiel des vitesses moyennes pratiquées des conducteurs pendant-avant et après-pendant le dépassement	118

Figure 4.17 : Évolution spatiale des vitesses des conducteurs pendant le dépassement et avant/après le dépassement.....	119
Figure E.1 : Matrice de corrélation au niveau des sites	155
Figure E.2 : Résultat du modèle de régression de la vitesse pratiquée moyenne après	156
Figure E.3 : Résidus du modèle de régression de la vitesse pratiquée moyenne après.....	157
Figure E.4 : Prédiction du modèle de régression de la vitesse pratiquée moyenne après.....	157
Figure E.5 : Résultats du modèle de régression sur le différentiel du ratio au niveau des sites ..	158
Figure E.6 : Résidus du modèle de régression sur le différentiel du ratio au niveau des sites	158
Figure E.7 : Prédiction du modèle de régression sur le différentiel du ratio au niveau des sites.	159
Figure E.8 : Matrice de corrélation au niveau des sites-relevés.....	160
Figure E.9 : Résultats du modèle de régression sur le pourcentage de contrevenants au niveau des sites-relevés	161
Figure E.10 : Résidus du modèle de régression sur le pourcentage de contrevenants au niveau des sites-relevés	162
Figure E.11 : Prédiction du modèle de régression sur le pourcentage de contrevenants au niveau des sites-relevés.....	162
Figure E.12 : Résultats du modèle de régression sur le ratio au niveau des sites-relevés.....	163
Figure E.13 : Résidus du modèle de régression sur le ratio au niveau des sites-relevés.....	163
Figure E.14 : Prédiction du modèle de régression sur le ratio au niveau des sites-relevés.....	164
Figure F.1 : Distributions des vitesses pratiquées et vitesse moyenne dans le temps du site 3 ...	165
Figure F.2 : Distributions des vitesses pratiquées et vitesse moyenne dans le temps du site 7 ...	166
Figure F.3 : Distributions des vitesses pratiquées et vitesse moyenne dans le temps du site 13 .	167
Figure F.4 : Distributions des vitesses pratiquées et vitesse moyenne dans le temps du site 17 .	168

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AQ	Adresses Québec
CIR	Informations sur la circulation routière
CSR	Code de la sécurité routière
DEL	Diode électroluminescente
DJMA	Débit journalier moyen annuel
DJME	Débit journalier moyen estival (mai à septembre inclusivement)
DJMH	Débit journalier moyen hivernal (octobre à avril inclusivement)
DR	Deceleration rate (taux de décélération)
FHWA	Federal Highway Administration
GLV	Gestion des limites de vitesse
GT	Gap time (intervalle de temps)
IF	Infrarouge
IIT	Inventaire des infrastructures de transports
IPS	Nombre d'images par seconde
MTQ	Ministère des Transports du Québec
PET	Post encroachment time (temps post-empiétement)
SAAQ	Société de l'assurance automobile du Québec
STI	Système de transport intelligent
TIV	Temps inter-véhiculaire
TTC	Time to collision (temps de collision)

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Grille d'observation	139
Annexe B Présentation des sites.....	142
Annexe C – Différentiels des vitesses moyennes pratiquées et des 85 ^e centiles des vitesses.....	148
Annexe D – Caractéristiques des sites du groupe cas-1	154
Annexe E – Modèles statistiques du groupe cas-1	155
Annexe F – Distributions des vitesses des sites retirés du groupe cas-2.....	165

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

La vitesse joue un rôle important dans les collisions de la route, puisqu'elle augmente la probabilité d'être impliqué dans une collision et augmente la gravité. Plusieurs dispositifs de contrôle, tels que les panneaux de limites de vitesse, sont utilisés pour influencer le comportement des conducteurs et leur choix de vitesse. Toutefois, ces limites prescrites ne sont pas toujours respectées par les usagers. Plusieurs facteurs peuvent influencer la perception de la vitesse sécuritaire à adopter et par conséquent, affecter la conformité aux limites de vitesse, dont : la géométrie de la route, les conditions de la circulation, les conditions climatiques et l'utilisation du sol. Le comportement des conducteurs est un enjeu important en sécurité routière, d'où l'intérêt d'étudier les facteurs qui affectent le choix des vitesses pratiquées pour mieux évaluer l'impact des interventions. Étant donné qu'il est difficile d'évaluer tous ces facteurs en une seule étude, trois d'entre eux ont été ciblés dans ce projet de recherche : la modification des limites de vitesse, les caractéristiques de la route et la présence de cyclistes.

1.1 Problématique

Les ingénieurs doivent assurer un équilibre entre la mobilité et la sécurité des routes, ce qui les amène à revoir régulièrement les limites de vitesse imposées. Malheureusement, l'implantation d'une nouvelle limite de vitesse n'a pas toujours l'effet escompté. En effet, une diminution de la vitesse affichée de 10 km/h n'entraîne pas systématiquement le respect de la nouvelle limite, c'est-à-dire une diminution des vitesses pratiquées de 10 km/h. L'effet d'une modification de la limite de vitesse sur le comportement des conducteurs est très variable d'une route à l'autre, ce qui complexifie le travail des ingénieurs et affecte la sécurité des usagers. Peu d'études ont étudié l'impact d'un changement de limites de vitesse sur le comportement des conducteurs et encore moins d'études ont tenté d'expliquer le choix des vitesses pratiquées à partir des caractéristiques de la route. Pour qu'une limite soit crédible, elle doit être réaliste et appropriée, selon les caractéristiques de la route et du bâti. Une limite de vitesse non crédible est une des principales raisons des excès de vitesse sur les routes. Effectivement, un changement aux limites de vitesse est rarement accompagné d'une modification de configuration de la route, d'où l'intérêt de comprendre comment les caractéristiques géométriques de la route ou de l'environnement routier affectent le comportement des conducteurs. Des modèles prédictifs peuvent être développés pour

anticiper les vitesses pratiquées à la suite d'une modification des limites de vitesse, ou tout simplement, pour évaluer la relation entre certaines caractéristiques de la route et le comportement des conducteurs. Un outil de prédiction performant peut être un atout pour les autorités responsables des limites de vitesse lorsque vient le temps de faire des changements.

Une seconde problématique concerne le partage de la route et la sécurité des cyclistes. En 2016, un nouveau règlement a été ajouté au Code de la sécurité routière (CSR) du Québec pour mieux protéger les cyclistes. Le règlement stipule que les conducteurs d'un véhicule peuvent dépasser un cycliste circulant sur la route uniquement s'ils respectent les deux conditions suivantes: réduire leur vitesse et maintenir une distance sécuritaire entre leur véhicule et le cycliste tout le long du dépassement. Sur les routes ayant une limite de vitesse supérieure à 50 km/h, la distance prescrite est de 1,5 m et sur les routes de 50 km/h et moins, la distance prescrite est de 1,0 m. Si les deux conditions ne sont pas respectées, le dépassement est interdit puisqu'il est considéré comme une manoeuvre dangereuse. Bien que les conducteurs soient dans l'obligation de se conformer à la réglementation, certains vont l'ignorer, ce qui met la vie des cyclistes en danger. Peu d'outils ont, à ce jour, été développés pour évaluer automatiquement les distances de dépassement des cyclistes. Une innovation dans ce domaine pourrait grandement aider le travail des corps policiers pour l'application de la réglementation. Pour ce qui est de la sécurité des usagers, un tel outil pourrait améliorer l'identification des zones problématiques et permettre un diagnostic détaillé des situations dangereuses, afin d'améliorer les interventions.

1.2 Objectifs de la recherche

Ce projet de recherche s'articule autour de deux objectifs principaux. Ces objectifs visent à évaluer le comportement des conducteurs dans différentes situations qui peuvent être critiques pour la sécurité routière.

OBJECTIF 1 : Évaluer le choix des vitesses pratiquées des conducteurs en fonction de la limite de vitesse, des caractéristiques géométriques de la route et de l'environnement routier sur les routes ayant subi une modification de limite de vitesse.

- Évaluer les vitesses pratiquées avant et après le changement de limite de vitesse en proposant des indicateurs.

- Proposer des modèles pour prédire le comportement des conducteurs en présence de certaines caractéristiques géométriques de la route et de l'environnement routier.

OBJECTIF 2 : Évaluer le comportement des conducteurs lors des dépassements avec les cyclistes.

- Proposer un outil pour évaluer automatiquement les distances de dépassements des cyclistes et les variations des vitesses pratiquées des conducteurs.
- Observer et évaluer les vitesses pratiquées des conducteurs ainsi que les positionnements de leur véhicule lors des manœuvres de dépassement (distance cycliste-véhicule).

1.3 Structure du mémoire

Le mémoire est divisé en cinq chapitres, dont le premier chapitre est dédié à la présente introduction. Les autres chapitres sont divisés comme suit.

- Le **chapitre 2** est une recension des écrits scientifiques. Cette revue de littérature vise à recenser leurs principaux écrits qui sont pertinents pour les objectifs de recherche. Cinq principaux sujets sont abordés : la relation entre les vitesses pratiquées et les collisions; les effets d'un changement de limite de vitesse et des caractéristiques de la route sur le comportement des conducteurs; la sécurité des cyclistes ; les méthodes de collecte de données et les systèmes de traitement d'images vidéo.
- Le **chapitre 3** concerne l'étude du comportement des conducteurs face aux limites de vitesse, aux caractéristiques géométriques de la route et de l'environnement routier lors d'un changement de limite de vitesse. Dans ce chapitre, la méthodologie, la présentation des sites, les résultats et l'analyse des données sont exposés.
- Le **chapitre 4** concerne l'étude du comportement des conducteurs lors des dépassements des cyclistes. Dans ce chapitre, le système de traitement de données par analyse vidéo est présenté, ainsi que les résultats, l'analyse de données, l'évaluation de l'outil vidéo, la validation de la mesure des vitesses et la validation de la mesure des distances de dépassements des cyclistes.
- Le **chapitre 5** présente la conclusion du projet, ainsi que des recommandations. La conclusion vise à exposer les principaux résultats, mais également, à présenter les limites de l'étude et les perspectives de recherche.

À la suite de ces chapitres, ce mémoire présente de nombreuses annexes qui viennent apporter des informations supplémentaires aux lecteurs. Il est à noter que plusieurs passages du chapitre 3 sont repris d'un rapport technique réalisé pour le compte du Ministère des Transports auquel j'ai collaboré. Le rapport s'intitule « Mesurer l'impact sur la sécurité routière d'une modification de limite de vitesse sur le réseau routier du Québec » (Cloutier, Lachapelle, & Saunier, 2018).

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Cette revue de littérature vise à résumer les connaissances dans ce domaine d'étude dans le but de mieux comprendre la problématique du projet de recherche et d'élaborer une méthodologie. La revue s'articule en six parties. La première présente un portrait de la relation entre les vitesses pratiquées et les collisions. La deuxième est un recensement d'études de cas qui ont évalué l'effet d'un changement de limite de vitesse sur la sécurité routière. La troisième traite des caractéristiques de la route et de l'environnement routier immédiat qui ont un effet sur le comportement des conducteurs. La quatrième présente des études sur la sécurité des cyclistes à partir de différentes méthodes d'évaluation des facteurs de risque. La cinquième présente des méthodes temporaires de collecte de données de vitesse. Enfin, la sixième présente des méthodes d'analyse vidéo pour la circulation motorisée et non motorisée.

2.1 Relation entre les vitesses pratiquées et les collisions

Plusieurs chercheurs ont démontré que l'augmentation de la vitesse augmente la probabilité du risque de collision et la gravité de ces collisions (Aarts & Van Schagen, 2006; Kloeden, McLean, & Moore, 1997).

2.1.1 Sévérité des collisions

La majorité des collisions qui surviennent sur la route engendrent seulement des dommages matériels. Les collisions corporelles, qui résultent en un blessé ou un décès, sont moins fréquentes. La gravité des collisions fait référence aux conséquences d'une collision et est généralement classée en quatre catégories : les dommages matériels, les blessés légers, les blessés graves et les décès. En général, les collisions qui se produisent à vitesse modérée ou élevée sont plus sévères que les collisions à basse vitesse (FHWA, 2017; Solomon, 1964). La relation entre la vitesse et la gravité des collisions s'explique à partir de la loi de l'énergie cinétique (E_c). Il s'agit d'une formule qui mesure l'énergie nécessaire pour qu'un objet de masse m acquière une vitesse v (Aarts & Van Schagen, 2006).

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

À masse constante, une augmentation de vitesse produit une augmentation de l'énergie dissipée lors d'un arrêt, ce qui résulte d'une plus grande force d'impact lors d'une collision. Par exemple, une augmentation de vitesse de 20 % entraîne une augmentation de 44 % de l'énergie cinétique à dissiper (Fildes, B. & Lee, 1993). Cette énergie générée en surplus augmente la probabilité de blessure en cas de collision. En plus de la vitesse d'impact, les chercheurs s'entendent pour dire que la gravité des collisions dépend, également, de la protection de l'utilisateur (Elvik, Rune, Christensen, & Amundsen, 2004). Par exemple, un passager qui n'a pas sa ceinture de sécurité risque de subir des blessures plus importantes qu'un passager ayant sa ceinture de sécurité. De plus, les usagers vulnérables, tels que les piétons, les cyclistes et les motocyclistes sont plus à risque de blessures que les occupants d'un véhicule.

2.1.2 Risque de collision

Plusieurs chercheurs ont tenté de prédire le nombre et la gravité des collisions à partir d'équations et de modèles mathématiques, et la plupart s'entendent pour dire que le risque de collision augmente avec la vitesse pratiquée. Au niveau microscopique, une augmentation de la vitesse provoque une diminution du temps de perception, une augmentation de la distance de freinage nécessaire et une diminution de la manœuvrabilité du véhicule (Aarts & Van Schagen, 2006). Ainsi, lors d'un événement potentiellement risqué, le conducteur augmente ses chances d'avoir une collision. Au niveau macroscopique, la relation entre les vitesses pratiquées et les collisions est beaucoup plus complexe et difficile à prédire. Il y a deux principales écoles de pensées : la première suggère que la variation de vitesse est à l'origine des collisions de la route, tandis que la deuxième soutient qu'il existe une forte corrélation entre la vitesse pratiquée moyenne et les collisions, autrement dit le « Power Model », qui sera abordé plus en détail (Elvik, Rune et al., 2004).

2.1.2.1 Variation des vitesses

Des chercheurs ont étudié l'effet de la variation des vitesses sur le risque de collisions. Ces études s'intéressent à la relation entre la vitesse, sa variance et le risque d'être impliqué dans une collision. Il y a environ 50 ans, Solomon (1964), Cirillo (1968) et Research Triangle Institute (1970), trois études américaines, ont tenté d'identifier et de développer une relation entre la vitesse et le risque d'être impliqué dans une collision. Pour ce faire, ces études ont déterminé les vitesses de précollision des véhicules endommagés et investigué les vitesses des véhicules non impliqués dans

une collision. Ces études ont toutes indiqué une relation similaire sous forme d'une courbe en « U » entre le risque de collision et la différence entre la vitesse pratiquée de chaque véhicule et la vitesse moyenne des autres véhicules autour d'eux. Selon ces résultats, la probabilité qu'une collision survienne est plus élevée lorsqu'un véhicule circule à une vitesse plus élevée ou plus faible que la vitesse moyenne. Ces résultats suggèrent que la diminution de la variation de vitesse entre les véhicules sur un tronçon donné diminuerait le risque de collision. Selon Solomon (1964), il s'agit de la variation de la vitesse pratiquée qui affecte le risque d'occurrence d'une collision et non la vitesse moyenne des véhicules.

Quelques années plus tard, la fiabilité des résultats de ces études a été critiquée en raison de biais méthodologiques sévères (Hauer, 2009; TRB, 1998). La relation sous forme de « U » semblerait erronée pour l'extrémité inférieure de la distribution de vitesse où il y aurait une amplification involontaire du taux d'implication pour des vitesses relativement faibles. Cette relation artificielle serait due à des erreurs dans la mesure de la vitesse (White & Nelson, 1970). Les vitesses de déplacement utilisées par ces études étaient basées sur des rapports de police, des auto-évaluations faites par les conducteurs impliqués et des estimations basées sur des caractéristiques des véhicules et des conducteurs. Certains se sont questionnés sur la validité des données, disant que certains conducteurs avaient tendance à sous-estimer leur vitesse de déplacement (Fildes, B. & Lee, 1993). Malgré tout, les chercheurs s'entendent pour dire que les résultats pour l'extrémité supérieure de la distribution de vitesse ne sont pas affectés par des biais méthodologiques importants et donc, ils sont considérés comme acceptables pour cette époque (Kloeden, Ponte, & McLean, 2001).

Les points faibles des études antérieures ont amené d'autres chercheurs à s'intéresser à la relation entre le risque d'être impliqué dans une collision et la variation des vitesses. Kloeden et al. (1997) ont comparé les vitesses des véhicules impliqués dans une collision à celles des véhicules qui n'ont pas été impliqués dans une collision sur des routes australiennes où la limite de vitesse était de 60 km/h. Ces chercheurs ont utilisé un programme de reconstruction des collisions pour estimer les vitesses pratiquées avant la collision. Selon les résultats, 68 % des véhicules impliqués dans une collision excédaient la limite de vitesse. Au-dessus de la limite de vitesse, le risque de collision augmente de manière exponentielle avec la vitesse pratiquée (Kloeden et al., 1997). Comparativement aux études antérieures, aucune relation significative n'a été observée pour des vitesses pratiquées inférieures à la limite de vitesse. Davis (2002) a, pour sa part, souligné que la corrélation positive entre la dispersion de vitesse globale et le risque de collision global ne fournit

aucune preuve concernant la relation entre la vitesse et le taux de collision pour les véhicules individuels. Ceci est expliqué en partie par le fait que le risque individuel est beaucoup plus complexe à prédire que le risque agrégé.

2.1.2.2 Vitesse moyenne

Durant le début des années 70, le gouvernement de la Suède a apporté de nombreuses modifications aux limites de vitesse. Nilsson (1982) s'est intéressé à l'impact de ces changements de limite de vitesse sur le nombre de collisions. Il a trouvé que la vitesse moyenne avait diminué et que le nombre de collisions était plus faible. Il a également trouvé des résultats inverses pour une augmentation de la limite de vitesse. Ces recherches l'ont mené à décrire des relations entre la vitesse moyenne et les collisions à partir d'une adaptation de l'équation de l'énergie cinétique (Aarts & Van Schagen, 2006). Toutefois, Nilsson s'est fait critiquer sur la clarté de la méthodologie adoptée durant cette étude. En 2004, Nilsson a élaboré des fonctions de puissance pour raffiner son modèle dans sa thèse de doctorat (Nilsson, 2004). Le modèle est connu sous le nom de « Power Model ». Ce modèle décrit la relation entre la vitesse et la sécurité routière en six équations (Elvik, Rune et al., 2004; Nilsson, 2004).

$$\text{Nombre de collisions mortelles :} \quad Y_1 = \left(\frac{V_1}{V_0}\right)^4 Y_0 \quad (2.2)$$

$$\text{Nombre de personnes décédées :} \quad Z_1 = \left(\frac{V_1}{V_0}\right)^4 Y_0 + \left(\frac{V_1}{V_0}\right)^8 (Z_0 - Y_0) \quad (2.3)$$

$$\text{Nombre de collisions mortelles et graves} \quad Y_1 = \left(\frac{V_1}{V_0}\right)^3 Y_0 \quad (2.4)$$

$$\text{Nombre de personnes décédées ou blessées gravement :} \quad Z_1 = \left(\frac{V_1}{V_0}\right)^3 Y_0 + \left(\frac{V_1}{V_0}\right)^6 (Z_0 - Y_0) \quad (2.5)$$

$$\text{Nombre de collisions avec blessés (tous) :} \quad Y_1 = \left(\frac{V_1}{V_0}\right)^2 Y_0 \quad (2.6)$$

$$\text{Nombre de personnes blessées (toutes) :} \quad Z_1 = \left(\frac{V_1}{V_0}\right)^2 Y_0 + \left(\frac{V_1}{V_0}\right)^4 (Z_0 - Y_0) \quad (2.7)$$

Où : les indices 0 et 1 correspondent aux situations respectivement avant et après modification de la vitesse moyenne

Y : nombre de collisions

Z : nombre de victimes

V : vitesse moyenne (km/h)

Le « Power Model » estime le nombre de collisions à l'aide de trois équations : une pour les collisions mortelles, une pour les collisions mortelles et graves et une autre pour les collisions avec blessés. La puissance de ces fonctions augmente selon la gravité des collisions. Nilsson suggère que le nombre de collisions mortelles et graves augmente plus rapidement avec l'augmentation de la vitesse que le nombre de collisions avec blessés et que le nombre de collisions mortelles augmente plus rapidement que le nombre de collisions mortelles et graves (Nilsson, 1982, 2004). Elvik, Rune et al. (2004) ont évalué le « Power Model » et ils ont conclu qu'il existe, effectivement, une relation statistique forte entre la vitesse et le risque de collisions. Néanmoins, ils ont trouvé un élément incohérent dans le modèle proposé par Nilsson. Les catégories de gravité de collisions et de blessures sont regroupées. Selon eux, les puissances attribuées à ces équations ne peuvent pas être vraies toutes en même temps pour une même catégorie. Ils ont adapté le modèle en traitant chacune des catégories de gravité exclusivement. La relation est présentée dans l'équation suivante. Le ratio du nombre de collisions ou de victimes avant et après est fonction du ratio des vitesses pratiquées moyennes avant et après élevé à un exposant. Les puissances des équations adaptées par Elvik, Rune et al. (2004) sont présentées au Tableau 2.1.

$$\frac{\text{Nombre de collisions (ou de victimes) avant}}{\text{Nombre de collisions (ou de victimes) après}} = \left(\frac{V_{\text{moy avant}}}{V_{\text{moy après}}} \right)^{\text{Puissance}} \quad (2.8)$$

Tableau 2.1 : Adaptation du Power Model par Elvik, Rune et al. (2004)

	Gravité des blessures et des collisions	Puissance
Blessures	Personnes décédées	4,5
	Personnes blessées gravement	3,0
	Personnes blessées légèrement	1,5
	Personnes blessées (toutes)	2,7
Collisions	Collisions mortelles	3,6
	Collisions graves	2,4
	Collisions légères	1,2
	Collisions avec blessés (tous)	2,0
	Collisions avec dommage matériel seulement	1,0

2.2 Effets d'un changement de la limite prescrite sur le risque de collision et les vitesses pratiquées

Plusieurs études de cas ont été faites à travers le monde, durant les dernières années, pour tenter d'expliquer l'effet d'un changement de la limite de vitesse sur la sécurité routière. Certaines régions ont renforcé leur réglementation en imposant des limites de vitesse plus faibles aux conducteurs, tandis que d'autres régions ont misé sur une augmentation de leur vitesse maximale permise.

2.2.1 En Amérique

États-Unis

En 1974, le coût du pétrole a explosé, ce qui a plongé les États-Unis dans une crise énergétique. Pour réduire la consommation d'essence, le congrès a imposé une limite de vitesse maximale nationale de 55 mph (89 km/h) (Farmer, Retting, & Lund, 1999). Auparavant, la réglementation de la vitesse était sous la responsabilité de chaque état et cette limite de vitesse maximale pouvait être de 70 à 75 mph (113 à 121 km/h) (Farmer, 2017). Cette nouvelle réglementation a été bénéfique

pour la société puisqu'elle a permis de sauver des milliers de vies. En un an, le taux de mortalité sur les routes américaines a diminué de 16,4 %, ce qui représente 8 856 vies épargnées (Partyka, 1991). Une fois le choc pétrolier terminé, la limite de vitesse maximale nationale a été conservée quelques années en raison de ces effets majeurs sur la sécurité routière. Puis, en 1987, le congrès a adouci sa réglementation en permettant aux états d'augmenter leur limite de vitesse à 65 mph (105 km/h) pour leurs autoroutes rurales. En 1988, 40 états avaient augmenté leur limite et les études ont démontré que les collisions mortelles avaient augmenté de 15 à 19 % (Baum, Wells, & Lund, 1991; Garber & Graham, 1990). En 1995, le congrès a aboli la limite de vitesse maximale nationale, permettant aux états d'avoir le pouvoir sur l'imposition de leur limite. Rapidement, plusieurs états ont augmenté leur limite de vitesse sur leurs autoroutes rurales entre 70 et 75 mph et certains ont, également, augmenté leur limite pour leurs autoroutes urbaines, passant de 55 à 65 mph. Au cours des premières années qui ont suivi ce changement, dix états ont fait une analyse de l'impact de l'augmentation de la vitesse sur le taux de mortalité (National Highway Traffic Safety Administration, 1998). Toutefois, neuf états ont affirmé ne pas avoir suffisamment de données pour conclure leur analyse. À partir des données de plusieurs états, il a été trouvé que le taux de mortalité sur les routes, à travers le pays, avait augmenté de 9 à 17 % (Farmer et al., 1999; National Highway Traffic Safety Administration, 1998).

Depuis cette période, les états ont continué d'augmenter leur limite de vitesse. En mai 2019, la vitesse maximale était de 75 mph (121 km/h) pour 11 états, de 80 mph (129 km/h) pour 7 états et de 85 mph (137 km/h) pour l'état du Texas. Récemment, des chercheurs se sont penchés sur l'effet à plus long terme de l'augmentation des limites de vitesse sur la société. Farmer (2017) a évalué l'effet sur une période de 20 ans, entre 1993 et 2013. Il a estimé le nombre de décès sur les routes s'il n'y avait eu aucun changement de limitation de vitesse depuis 1993 et il a comparé ces résultats avec les données réelles de décès. Selon son étude, une augmentation de 5 mph (8 km/h) provoque une augmentation du taux de mortalité de 8,3 % pour les autoroutes et de 4 % pour les autres routes. Finalement, il a trouvé qu'environ 33 000 décès de la route auraient pu être évités. Friedman, Hedeker et Richter (2009) ont, pour leur part, mesuré l'effet à long terme de l'abolition de la limite de vitesse maximale nationale de 1995 à 2005. Selon cette étude, le taux de mortalité a augmenté de 3,2 % et le taux de blessés graves a augmenté de 3,9 %, ce qui représente sur cette période de 10 ans, 12 545 décès et 36 583 blessés graves qui sont attribuables à l'augmentation des limites de vitesse. Également, ce surplus de collisions représente environ 12 milliards de dollars américains.

Canada

À Vancouver, le Ministère des Transports et des Infrastructures de la Colombie-Britannique a recommandé d'augmenter les limites sur les autoroutes rurales d'au moins 10 km/h pour 1 300 km de routes, à la suite d'une étude faite en 2013. Dans cette étude, il a été constaté que le 85^{ème} centile des vitesses enregistrées sur 9 100 km de routes était d'environ 10 km/h plus élevé que la vitesse prescrite (Sayed & Sacchi, 2016). Également, une diminution des collisions graves a été observée sur l'ensemble de la région depuis 10 ans, suite à un investissement majeur du gouvernement, pour l'amélioration des corridors routiers principaux de la Colombie-Britannique (Government of BC, 2014). Ainsi, en 2014, le ministère a augmenté de 10 km/h la plupart des sections d'autoroute rurale, et certaines ont été augmentées de 20 km/h. Sayed et Sacchi (2016) ont entrepris une étude de cas avant (mars 2012 à juin 2014) et après (juillet 2014 à octobre 2015) pour évaluer l'effet de l'augmentation de vitesse sur le risque de collision. Comparativement aux études antérieures, il a été observé que les collisions graves et mortelles ont augmenté significativement de 11,1 %. Toutefois, ce taux tend à diminuer au fil du temps, puisque les premiers mois après l'implantation des nouvelles mesures ont connu un nombre plus élevé de collisions, probablement dû à l'adaptation des conducteurs.

Puis, en 2010, la ville d'Edmonton en Alberta a réduit les limites de vitesse de 50 à 40 km/h sur les rues de six quartiers résidentiels. Islam, El-Basyouny et Ibrahim (2014) ont étudié l'effet du changement de limite de vitesse sur les vitesses pratiquées à partir d'une étude de cas avant-après. Ces chercheurs ont trouvé que les vitesses moyennes en écoulement libre ont diminué de 3,9 km/h après les trois premiers mois et de 4,9 km/h après les six mois suivants la modification de la limite. Ils ont également observé une légère augmentation dans les vitesses moyennes des sites de contrôle.

2.2.2 En Europe

Suède

Depuis 1997, la Suède a adopté la Vision Zéro en ce qui a trait à la sécurité routière. Selon cette idée, aucun décès ni blessés graves ne sont acceptables sur le réseau routier. Selon cette vision, des changements doivent être entrepris pour améliorer le bilan routier, autant pour la sécurité des automobilistes que pour les usagers vulnérables. Des changements ont été apportés aux limitations de vitesse, en 2008 et 2009, par le « Swedish Transport Administration », pour qu'elles soient

mieux adaptées aux types de routes. Au total, 20 500 km de routes ont été modifiés, dont environ 2 700 km ont connu une augmentation et 17 800 km, une diminution. Ces changements de vitesse sont de l'ordre de 10 à 20 km/h selon le type de route. Vadeby et Forsman (2017) ont évalué l'impact de ces changements sur le nombre de collisions avec la méthode avant et après et ils ont conclu que, globalement, 17 vies avaient été sauvées par an, depuis ces modifications. Pour les autoroutes où la limite de vitesse est passée de 110 à 120 km/h, le nombre de collisions mortelles et graves a augmenté de 15 par an pour les 261 km à l'étude, mais le nombre de décès est non significatif par manque de données. Puis, les routes en 2+1 (une voie par sens avec une voie au milieu en alternance) passant de 110 à 100 km/h ont connu une diminution de 17 collisions mortelles et graves par an. Les collisions mortelles sur les routes rurales passant de 90 à 80 km/h ont diminué de 14 par an. Finalement, les autres types de routes à l'étude n'ont pas obtenu des résultats significatifs. Pour ce qui est de la vitesse moyenne, une diminution de la limite de vitesse de 10 km/h a entraîné une diminution entre 2 et 3 km/h des vitesses pratiquées moyennes et une augmentation de la limite de 10 km/h a entraîné une augmentation des vitesses moyennes de 3 km/h.

Norvège

À Oslo, en Norvège, la ville a imposé une diminution des limites de vitesse entre le 1^{er} novembre 2004 et le 31 mars 2005, comme projet pilote, en raison de la pollution de l'air, plus importante, en hiver. Les deux plus grandes sources de pollution en hiver sont les voitures et le chauffage. Pour la santé des gens, la limite de vitesse a diminué de 80 à 60 km/h sur une route nationale de 7,4 km (*National road 4*). Ce projet pilote a été un succès, puisque la propagation de particules dans l'air a diminué. Ainsi quelques années plus tard, deux nouvelles routes ont été ajoutées à ce projet : une autoroute de 15,6 km (*Ring 3 road*) et une autre de 4,7 km (*European road 18*). Ce projet a permis de diminuer de 25 à 35 % les collisions avec blessures corporelles, en plus d'améliorer la qualité de l'air (Elvik, Rune, 2013). Également, la vitesse moyenne a diminué de 6,5 km/h pour deux de ces routes, tandis que le *European road 18* a subi une diminution de 3,1 km/h. En plus d'avoir subi la plus petite diminution des vitesses pratiquées moyennes, le *European road 18* a la plus grande réduction du pourcentage de collisions comparativement aux deux autres routes. Ce constat amène Elvik, Rune (2013) à suggérer que les collisions dépendent non seulement des vitesses, mais également, d'autres facteurs.

Belgique

Dans la province de Limbourg, en Belgique, le gouvernement flamand a également réduit la limite de vitesse de 90 à 70 km/h sur 61 sections de route, pour un total de 116 km, entre 2001 et 2002. 80 % des routes sont des routes locales, 15 % des routes secondaires et 5 % des routes primaires. De Pauw, Daniels, Thierie et Brijs (2014) ont démontré, à partir d'une analyse de cas avant-après, une diminution de 5 % du taux de collisions avec blessures et une diminution de 33 % pour les collisions graves et mortelles après le changement. L'étude s'est également penchée sur l'effet de la vitesse aux intersections et aux sections de route. Il a été trouvé que le nombre de collisions graves a diminué significativement de 36 % sur les sections de routes et seulement de 6 % aux intersections (non significatif).

2.2.3 En Asie

Israël

Des résultats similaires sont observés en Israël et en Chine. En 1993, en Israël, le gouvernement a augmenté la limite de vitesse de 3 grandes routes interurbaines, passant de 90 à 100 km/h, sur une longueur totale de 115 km. En même temps, il a rendu obligatoire le port de la ceinture de sécurité à l'arrière, ainsi que les feux de jour sur les véhicules. Richter, Barach, Friedman, Krikler et Israeli (2004) ont démontré que ces changements de vitesse ont augmenté de 15 % les collisions mortelles et de 38 % les collisions graves sur les routes interurbaines. Un an après la modification, la vitesse pratiquée moyenne a augmenté de 4,5 % pour les voies lentes (voies de droite) et de 9,1 % pour les voies rapides (voies de gauche). Cette étude a, également, permis d'observer une augmentation des collisions mortelles et graves sur toutes les routes urbaines de la région, bien qu'il n'y ait eu aucun changement de la vitesse maximale permise. Ceci est possiblement dû à l'effet de débordement de vitesse (« speed spillover ») qui se produit lorsque les conducteurs, venant d'une route à vitesse plus élevée, conservent leur vélocité sur les routes avoisinantes à vitesse plus faible (Friedman, Barach, & Richter, 2007).

Chine

À Hong-Kong, en Chine, le ministère des transports a augmenté les limites de vitesse de 10 à 20 km/h sur dix-neuf routes principales entre 1999 et 2002. La limite de vitesse est passée de 50 à 70 km/h pour treize de ces routes et de 70 à 80 km/h pour les autres routes. Wong, Sze, Lo, Hung et

Loo (2005) ont étudié l'effet de cette augmentation sur le nombre de collisions produit et ils ont comparé les résultats avec des sites semblables. Le nombre de collisions mortelles et graves a augmenté de 1 % pour les routes passant de 50 à 70 km/h et de 36 % pour les routes passant de 70 à 80 km/h.

2.2.4 En Océanie

Australie

En 1987, à Victoria, la limite de vitesse sur les autoroutes a augmenté de 100 à 110 km/h et deux ans plus tard, le gouvernement a modifié à nouveau ces limitations de vitesse, mais cette fois-ci à la baisse, revenant à des limites de 100 km/h. Sliogeris (1992) a fait une étude sur le nombre de collisions par kilomètre parcourus pour les périodes «avant 110», «durant 110» et «après 110». Il a été trouvé que le nombre de collisions a augmenté de 25 % après une augmentation de la limite de vitesse et a diminué de 19 % après une diminution de la limite. Ces résultats intéressants ont encouragé le sud de l'Australie à baisser les limites de vitesse de 110 à 100 km/h sur environ 1 100 km de routes rurales en 2003. Mackenzie, Kloeden et Hutchinson (2015) ont évalué les données de collisions dix ans avant et dix ans après la modification de la limite de vitesse. Ils ont trouvé que le nombre de collisions global a diminué significativement de 27,4 % et que la vitesse pratiquée moyenne est passée de 102 à 98 km/h. La méthodologie adoptée n'est pas parfaite, néanmoins, il est évident, selon ces chercheurs, que cette modification de limitation de vitesse (à la baisse) a un effet favorable sur la diminution du nombre de collisions.

En 2003, le gouvernement du sud de l'Australie a réduit la limite de vitesse par défaut de 60 à 50 km/h, ce qui touche certaines routes collectrices, locales urbaines et locales rurales de la région. Les vitesses pratiquées moyennes avant le changement ont été comparées aux vitesses moyennes un an et trois ans après. Kloeden, Woolley et McLean (2006) ont observé une diminution de la vitesse moyenne de 2,3 km/h à la première année et de 3,8 km/h à la troisième année, comparativement à la période avant la modification. Ils ont également observé une légère diminution des vitesses pratiquées de 0,9 km/h la première année et de 2,1 km/h la troisième année pour les routes de 60 km/h n'ayant eu aucun changement de limite de vitesse. Alors, l'impact net d'une diminution de 10 km/h a été estimé à une réduction de 1,7 km/h des vitesses pratiquées après trois ans (Islam et al., 2014).

2.2.5 Résumé

Une augmentation des limites de vitesse entraîne une augmentation des vitesses pratiquées et du nombre de collisions, tandis qu'une diminution des limites de vitesse est associée à une diminution des vitesses pratiquées et du nombre de collisions. Cependant, le changement de limite de vitesse n'apporte pas systématiquement un changement proportionnel des vitesses pratiquées. Par exemple, une diminution des limites de vitesse de 10 km/h entraîne en moyenne une diminution de l'ordre de 2 à 5 km/h des vitesses pratiquées moyennes (Islam et al., 2014; Kloeden et al., 2006; Vadeby & Forsman, 2017). Un constat similaire est observé pour les augmentations des limites de vitesse. La vitesse joue un rôle important sur le nombre de collisions. Toutefois, certains facteurs externes semblent affecter les vitesses pratiquées et le risque de collisions.

2.3 Effets des caractéristiques de la route et de l'environnement routier sur le comportement des conducteurs

Les panneaux de limitation de vitesse n'entraînent pas toujours le comportement requis, et il n'est pas rare que les conducteurs excèdent ces limites (Fildes, B. & Lee, 1993). Typiquement, 40 à 50% des automobilistes vont circuler au-delà de la vitesse permise (OECD/ECMT, 2006). Comme il a été discuté précédemment, la vitesse est un facteur important au niveau de la sécurité routière, puisqu'elle affecte la gravité des collisions et le risque d'être impliqué dans une collision. Les autorités tentent de changer le comportement des conducteurs par l'éducation, le renforcement des contrôles de vitesse, les modifications à l'environnement routier et à la route, ainsi qu'à l'intégration d'aide à la conduite dans les véhicules (Warner & Aberg, 2008). Toutefois, les effets de ces mesures sont limités dans le temps et l'espace (Comte, Varhelyi, & Santos, 1997). Pour changer le comportement des conducteurs, il faut, tout d'abord, comprendre pourquoi ils excèdent les limites de vitesse et quels sont les facteurs qui affectent leur vitesse adoptée. Le comportement des conducteurs est affecté par de nombreux facteurs externes tels que la conception de la route, l'environnement routier, les dispositifs de contrôle de circulation, la présence d'autres véhicules et les conditions climatiques (Gargoum, El-Basyouny, & Kim, 2016; Goldenbeld & van Schagen, 2007; Wilmot & Khanal, 1999). Le choix de la vitesse pratiquée est, également, affecté par des facteurs cognitifs, comme la perception, le raisonnement et le jugement moral (Warner & Aberg, 2008).

L'un des facteurs les plus importants, qui affecte la perception de la vitesse sécuritaire et de la vitesse à adopter, est la conception de la route (Ben-Bassat & Shinar, 2011; Martens, Comte, & Kaptein, 1997). Plusieurs éléments sont inclus dans cette catégorie, entre autres, la largeur des voies et des accotements, la présence et la largeur de la séparation centrale et les alignements horizontaux et verticaux. L'environnement routier affecte également la perception et le comportement des conducteurs. L'influence de ces facteurs sur les vitesses pratiquées et les collisions est abordée plus en détail dans cette section, mais avant tout, il est important d'aborder le sujet de la crédibilité des limites de vitesse.

2.3.1 Crédibilité des limites de vitesse

L'implantation d'une limite de vitesse est principalement basée sur les recommandations des ingénieurs et des guides. Habituellement, les ingénieurs en Amérique du Nord recommandent la vitesse au 85^e centile de la distribution des vitesses observées. La vitesse au 85^e centile représente la vitesse à laquelle 85 % des véhicules circulent dans des conditions d'écoulement libre. Les ingénieurs recommandent cette vitesse dans les guides, puisqu'elle minimise les collisions et favorise des flux de circulation uniforme (Forbes, Gardner, McGee, & Srinivasan, 2012). Toutefois, plusieurs raisons (zone scolaire, pression politique, problèmes de sécurité, etc.) poussent les municipalités et le gouvernement à appliquer, à l'occasion, une limite de vitesse plus basse que celle recommandée par les ingénieurs (Gayah, Donnell, Yu, & Li, 2018). Les observations au terrain de la majorité des études suggèrent que les limites de vitesse faibles ont peu d'impact sur le comportement des conducteurs, puisque l'environnement routier favorise généralement des vitesses pratiquées plus élevées que celle affichée (Donnell, Gayah, Yu, Li, & DePrator, 2016). Gayah et al. (2018) ont étudié les vitesses pratiquées et l'historique des collisions sur les routes rurales du Montana où les limites de vitesse suivent les recommandations des ingénieurs et celles où les limites sont plus faibles que les recommandations. Ils ont conclu qu'une limite de vitesse égale ou 5 mph (8,1 km/h) plus petite que la limite recommandée augmente le taux de conformité à la limite, diminue les vitesses pratiquées, et réduit le nombre et la fréquence des collisions (mortelles et avec blessures). En revanche, une différence trop élevée entre la limite recommandée et la limite affichée entraîne des résultats contraires, soit une diminution du taux de conformité à la limite, une augmentation des vitesses pratiquées et une augmentation de la fréquence de collisions (mortelles, avec blessures et dommages matériels).

Pour qu'une limite soit crédible, elle doit être réaliste et appropriée selon les caractéristiques de la route et de l'environnement immédiat (Goldenbeld & van Schagen, 2007). Une limite de vitesse non crédible correspond à une vitesse trop basse selon les propriétés de la route et de ses abords. Il s'agit d'une des principales raisons des excès de vitesse sur les routes (Kanellaidis, Golias, & Zarifopoulos, 1995; OECD/ECMT, 2006). Les conducteurs se fient à leur jugement : s'ils jugent que la limite de vitesse est trop faible, ils vont ignorer la signalisation et conduire à une vitesse qu'ils considèrent comme sécuritaire et acceptable (Kanellaidis et al., 1995). À la longue, les utilisateurs peuvent mépriser le système en entier, et s'en tenir uniquement à leur propre décision, ce qui peut remettre en question l'utilité des limites de vitesse (Goldenbeld & van Schagen, 2007). La vitesse appropriée devrait refléter l'importance fondamentale de protéger la vie humaine et de prévenir les blessures sur la route (OECD/ECMT, 2006). Goldenbeld et van Schagen (2007) ont tenté d'étudier la crédibilité des limites de vitesse à partir de différentes caractéristiques des routes. Ils ont questionné près de 600 personnes à partir de photographies de différentes configurations de route, pour étudier celles ayant une limite de vitesse de 80 km/h. Ils ont demandé d'indiquer la limite de vitesse que les conducteurs jugeaient sécuritaire et la vitesse qu'ils adopteraient dans ces conditions. Plusieurs caractéristiques ont été étudiées, telles que la présence de courbes, les largeurs de voie, la visibilité, la présence de bâtiments, les voies cyclables, la végétation, etc. En moyenne, les conducteurs préféreraient conduire 8 km/h au-dessus de la limite et ils ont jugé la limite de vitesse sécuritaire de 4 km/h au-dessus de celle réelle. Goldenbeld et van Schagen (2007) ont conclu que la crédibilité est influencée par les caractéristiques de la route et de l'environnement routier, mais qu'elle diffère d'un groupe de conducteurs à l'autre. Il est donc, impossible, selon eux, de fixer une limite crédible pour tous, toutefois, elle peut être plus crédible pour tout le monde. Pour ce faire, ils suggèrent de modifier la limite de vitesse à la route ou de modifier les caractéristiques de la route pour correspondre à la limite choisie.

2.3.2 Caractéristiques géométriques de la route

Plusieurs caractéristiques géométriques de la route, qui ont un effet sur le comportement des conducteurs, ont été identifiées dans la littérature. Cette revue de littérature s'attarde sur les principales caractéristiques de la route qui semblent avoir un effet plus important sur les vitesses pratiquées : la largeur de voie, la présence et la largeur d'accotement, la présence et le type de séparation centrale, ainsi que les alignements horizontaux et verticaux.

2.3.2.1 Largeur de voie

Le rétrécissement de la largeur des voies a une influence importante sur la perception de la vitesse à adopter et sur la vitesse moyenne pratiquée par les conducteurs (Fildes, B. N., Fletcher, & Corrigan, 1987; Godley, Triggs, & Fildes, 2004). Plusieurs chercheurs s'entendent pour dire que les routes et les voies étroites entraînent des vitesses de déplacement plus faibles. Les voies étroites demandent une meilleure concentration pour maintenir le véhicule à l'intérieur des lignes et elles rendent l'environnement routier moins sécuritaire pour les conducteurs (De Waard, Jessurun, Steyvers, Raggatt, & Brookhuis, 1995). Lorsque les usagers font face à une situation dangereuse ou risquée, ils adaptent leur conduite en diminuant leur vitesse de déplacement (Summala, 1996). Toutefois, une largeur trop faible rend la conduite très difficile, ce qui peut diminuer la sécurité de la route.

Tout d'abord, plusieurs études ont montré que la réduction des largeurs de voies engendrait une diminution de la vitesse pratiquée sur le tronçon affecté. Yagar et van Aerde (1983) ont trouvé qu'une réduction de la largeur de voie d'un pied (0,30 m) entraîne une diminution de la vitesse moyenne de 1,1 mph (1,8 km/h) sur les autoroutes à deux voies. Également, Heimbach, Cribbins et Chang (1983) ont démontré une diminution de 0,6 mph (1,0 km/h) pour un rétrécissement de la voie d'un pied durant les heures hors pointe sur des corridors urbains. Pour leur part, Fitzpatrick, Carlson, Brewer et Wooldridge (2001) ont trouvé qu'une augmentation de la largeur de voie d'un mètre entraîne une augmentation de 15 km/h de la vitesse au 85^e centile pour les routes de 4 voies en milieu périurbain. Ma, Zeng et Yang (2010) ont observés des résultats semblables, soit une augmentation de 15 km/h de la vitesse moyenne et une augmentation de 16 km/h de la vitesse au 85^e centile lorsque la largeur des voies augmentait d'un mètre pour des routes en milieu urbain.

Ensuite, il a été démontré par d'autres recherches que la vitesse dans un flux de circulation a un effet important sur le taux de collisions (Solomon, 1964). Ainsi, nombreux chercheurs ont tenté de trouver la largeur de voie optimale pour assurer la sécurité des usagers. Dès 1954, Belmont (1954) a trouvé que les voies de 10 pieds (3,0 m) provoquaient 5 % plus de collisions que les voies de 11 pieds (3,4 m), et que les voies de 12 pieds (3,7 m) causaient 1 % plus de collisions que les voies de 11 pieds. Dart et Mann (1970) ont observés des résultats semblables. Puis, les études plus récentes tentent de créer des algorithmes de prédiction pour connaître les effets sur la sécurité selon différentes caractéristiques, comme la largeur de voie et d'accotement. Harwood, Council, Hauer,

Hughes et Vogt (2000) ont démontré que la probabilité de collisions augmente lorsque les voies sont plus étroites en milieu rural sur les autoroutes à deux voies. Cette observation est plus prononcée lorsque le débit de véhicules augmente.

2.3.2.2 Présence et largeur d'accotement

Les accotements ont de nombreuses fonctions, dont permettre les arrêts d'urgence et corriger les erreurs d'alignement (de positionnement latéral) de conduite (AASHTO, 2004; Stamatiadis, Pigman, Sacksteder, Ruff, & Lord, 2009). Lorsque les accotements sont larges, les conducteurs ont tendance à augmenter leur vitesse puisqu'ils sont plus en confiance et ils ont un meilleur sentiment de sécurité (Stamatiadis et al., 2009). Toutefois, les effets de la largeur des voies et des accotements se combinent (Stamatiadis et al., 2009), ainsi des voies étroites peuvent diminuer l'effet de la présence et de la largeur d'accotement (Hamdar, Qin, & Talebpour, 2016).

Yagar et van Aerde (1983) ont constaté une petite augmentation des vitesses pratiquées en présence d'accotements pour les routes rurales à 2 voies contiguës. Bella (2013) a trouvé des résultats semblables dans son étude avec un simulateur de conduite. Une différence de 3,8 km/h de la vitesse moyenne a été observée entre les routes avec accotement de 1,50 m et sans accotement. Les participants roulaient plus rapidement lorsqu'il y avait la présence d'un accotement sur une section de route rurale à 2 voies. Également, elle a démontré que la position latérale des véhicules était en moyenne 0,20 m plus éloignée du centre de la route lorsqu'il y avait un accotement à droite. Mecheri, Rosey et Lobjois (2017) ont, pareillement, étudié l'effet des largeurs de voies et d'accotement sur le positionnement des véhicules par rapport au centre de la chaussée, à l'aide d'un simulateur de conduite pour une route rurale de deux voies. Selon leur étude, le positionnement latéral du véhicule par rapport au centre de la voie augmente significativement lorsque l'accotement est de 0,50 m et plus, avec ou sans trafic.

Par ailleurs, Zegeer et Deacon (1987) ont investigué plus de 30 articles, entre 1940 et 1980, pour évaluer, entre autres, l'effet de la largeur d'accotement sur le taux de collisions sur les autoroutes rurales à deux voies. Ils ont conclu que le taux de collisions (de type sortie de route ou collision frontale) diminue avec l'augmentation de la largeur d'accotement, mais que l'effet est plus important pour la largeur de voie. Hadi, Arulldhas, Chow et Wattleworth (1995) ont trouvé qu'une augmentation de la largeur d'accotement non pavé d'un pied (0,30 m) peut diminuer de 1 à 3 % le nombre de collisions sur les routes rurales à 4 voies.

2.3.2.3 Présence et type de séparation centrale

Les médianes (séparation centrale) sont des objets physiques de différents types (ex. îlot en béton, terre-plein gazonné et barrière) installés au centre de la chaussée, qui permettent de séparer des flux de trafic opposés (Hamdar et al., 2016). Leur objectif principal est d'assurer la sécurité des usagers en empêchant les collisions de type face-à-face. Des études ont démontré que la présence d'une séparation centrale diminue la gravité des collisions, mais augmente les vitesses pratiquées.

Tout d'abord, il a été observé que la présence d'une médiane entraîne des vitesses plus élevées que lorsqu'il n'y a pas de séparation entre les directions opposées (Fitzpatrick, Carlson, Wooldridge, & Brewer, 2000; Tay & Churchill, 2007). Fitzpatrick et al. (2000) ont étudié les effets de différentes caractéristiques des routes en milieu urbain et périurbain sur les vitesses pratiquées. Ils ont trouvé que la vitesse moyenne de tous leurs sites similaires était de 60 km/h pour des routes sans séparation et de 67 km/h avec une séparation, soit une différence de 7 km/h. Ils ont également tenté de trouver un effet entre les vitesses et le type de médiane, mais ils n'ont pas trouvé de résultats significatifs. Tay et Churchill (2007) ont, pour leur part, trouvé des résultats plus concluants. Ils ont étudié le comportement des conducteurs en présence de différents types de barrières centrales et ils ont évalué la perception du risque associée aux barrières. L'étude a été faite sur des routes urbaines de Calgary ayant des limites de vitesse de 70 et 80 km/h. Les sites choisis ont des caractéristiques géométriques similaires et comportent différents types de barrières longitudinales au centre de la chaussée. Les résultats trouvés indiquent que la présence de certains types de barrières engendre des vitesses pratiquées plus élevées que les sites sans barrières. Les médianes améliorent la perception de sécurité et augmentent la vitesse jugée confortable par les conducteurs. Également, il a été observé, dans des zones de 70 km/h, que les vitesses moyennes sont de 2,2 à 4,7 km/h plus élevées avec des barrières de type « W-Beam » que sans séparation centrale. De plus, les recherches suggèrent que la hauteur des barrières peut avoir un effet sur la vitesse choisie par le conducteur.

Ensuite, il a été trouvé que les séparations centrales sont statiquement reliées au nombre de collisions et que le type peut contribuer à la variation de la fréquence de collisions (Elvik, Rune, 1995; Strathman, Duecker, Zhang, & Williams, 2001). Selon Strathman et al. (2001), les fréquences de collision sont plus faibles pour des routes divisées et lorsque les séparateurs sont plus larges. Cependant, Elvik, Rune (1995) a trouvé des résultats différents. Selon ses recherches, la présence de barrières augmente la fréquence de collisions, mais diminue la gravité de collisions.

2.3.2.4 Alignements horizontaux et verticaux

Une bonne coordination entre les tangentes et les courbes est nécessaire pour éviter tous changements de vitesse inutiles, qui peuvent s'avérer dangereux. Les conducteurs peuvent être surpris par un changement brusque de l'alignement de la route, ce qui peut entraîner des manœuvres inappropriées (Jacob, Dhanya, & Anjaneyulu, 2013).

2.3.2.4.1 Tangentes

Les tangentes sont les sections droites de la route où il n'y a aucune courbe horizontale et verticale. Une tangente longue peut être monotone et entraîner la fatigue au volant, ce qui peut affecter la vigilance des conducteurs (Smith & Lamm, 1994). Les automobilistes peuvent être portés à circuler à des vitesses excessives, puisque certains jugeront la vitesse confortable et sécuritaire et d'autres n'auront pas conscience de leur excès de vitesse.

2.3.2.4.2 Courbes horizontales

Les courbes horizontales sont connues comme cause de problèmes importants au niveau de la sécurité routière (Hamdar et al., 2016). Elles sont associées à l'un des plus grands risques de collisions déclenchés par un élément de l'alignement routier (Bella, 2015). Ces collisions peuvent être expliqués par la perception biaisée des conducteurs au moment de prendre la courbe (Cartes, 2002). Shankar, Mannering et Barfield (1996) ont développé un modèle statistique pour prédire la probabilité de collisions selon les caractéristiques des autoroutes américaines en milieu rural. Ils ont trouvé, entre autres, que plus le nombre de courbes par kilomètre est élevé, plus les conducteurs sont susceptibles d'avoir une collision, puisque les courbes horizontales affectent le contrôle du véhicule et réduit la distance de visibilité. Également, Zegeer, Stewart, Council, Reinfurt et Hamilton (1992) ont tenté de quantifier la relation entre les courbes horizontales et le niveau de sécurité de la route à partir d'une base de données de 10 900 courbes sur des routes à deux voies dans l'état de Washington. Leurs modèles statistiques ont révélé que le nombre de collisions augmente avec l'augmentation du degré de courbure; que le nombre de collisions est plus élevé pour les routes étroites et que le nombre de collisions est plus faible pour les courbes avec spirale que les courbes sans spirale. De plus, la présence d'accotement pavé le long d'une courbe horizontale réduirait le nombre de collisions jusqu'à 33 %.

Ensuite, les vitesses pratiquées peuvent être affectées par différentes caractéristiques de la courbe, dont le rayon, la longueur, le degré de courbure, la surélévation et la friction latérale (Boroujerdian, Seyedabrishami, & Akbarpour, 2016). Shallam et Ahmed (2016) ont élaboré un modèle prédictif de la vitesse pratiquée selon différentes caractéristiques des courbes horizontales sur les autoroutes en Inde. Dans l'étude, ils ont utilisé le 85^{ème} centile des vitesses pratiquées, ce qui représente la vitesse acceptée par la majorité des utilisateurs. Ils ont trouvé que le rayon de la courbe, la distance de visibilité, ainsi que l'angle de déviation ont une relation significative avec la vitesse pratiquée à l'entrée d'une courbe. Ces résultats sont cohérents avec ceux d'une étude malaisienne (Abbas, Adnan, & Endut, 2011).

2.3.2.4.3 Courbes verticales

Il existe deux catégories de courbes verticales : les courbes saillantes et les courbes rentrantes. Les courbes saillantes sont en forme de crête, tandis que les courbes rentrantes sont en forme de creux. Ces deux types de courbes sont illustrés à la figure 2.1.

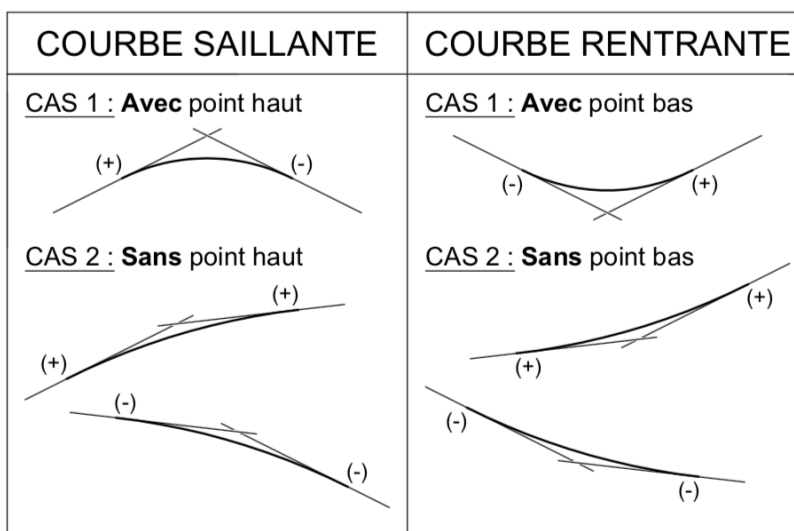


Figure 2.1 : Types de courbes verticales

Glennon (1987) a constaté dans différentes études que le taux de collisions est plus élevé dans des sections de route en pente que celles planes. Également, le taux de collisions est plus élevé dans une pente raide que dans une pente douce et il est plus élevé dans une pente descendante que dans une pente montante. Pour leur part, Hamdar et al. (2016) ont investigué le comportement des conducteurs face à différentes caractéristiques et conditions de la route, dont les courbes verticales.

Dans leurs travaux, ils n'ont pas observé de conduite plus dangereuse dans des zones montagneuses ou des routes vallonnées que sur les routes linéaires.

2.3.2.4.4 Combinaison de courbes horizontales et verticales

Lorsque les courbes horizontales et verticales se chevauchent, l'erreur de perception est plus importante en raison de la complexité de l'alignement (Smith & Lamm, 1994). Il peut se produire à un certain moment une perte visuelle partielle ou totale de la plateforme de la route, ce qui rend incertaine la trajectoire à suivre pour le conducteur (Ministerio de Fomento, 2016).

La vue tridimensionnelle des conducteurs peut être biaisée lorsque les courbes verticales saillantes ou rentrantes sont combinées avec une courbe horizontale. Selon les hypothèses émises par Smith et Lamm (1994), lorsqu'elle est combinée avec une courbe verticale rentrante, la courbe horizontale paraît plus plate qu'elle n'est réellement. Cette erreur de perception peut mener les conducteurs à adopter des vitesses plus élevées qui risquent de provoquer une collision. Puis, lorsqu'elle est combinée avec une courbe verticale saillante, la courbe horizontale paraît plus nette (voir figure 2.2).

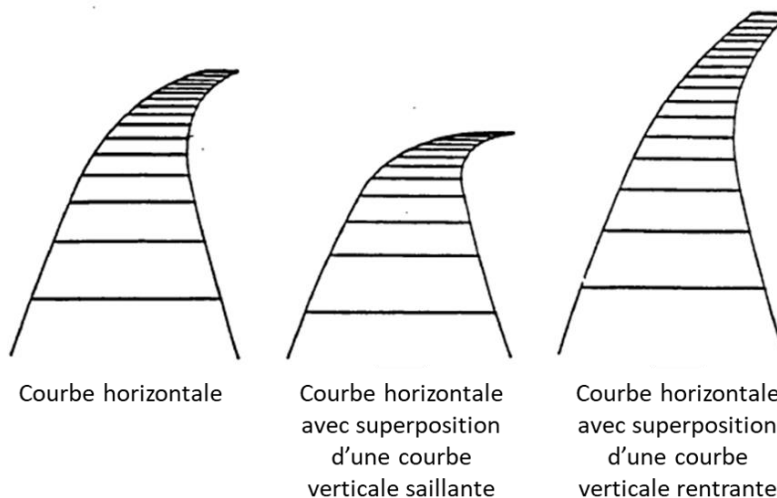


Figure 2.2 : Vue tridimensionnelle des combinaisons des courbes horizontales et verticales

(Transportation Research Record: *Journal of the Transportation Research Board*, 1994. 1445:

Figure 8, p.82) © 1994 National Academy of Sciences

Plusieurs guides de conception des routes suggèrent d'éviter de chevaucher des courbes horizontales et verticales. Si ce n'est pas possible, ils suggèrent d'atténuer l'effet en juxtaposant

les sommets des courbes et d'implanter des courbes de longueurs similaires (AASHTO, 2004; Ministère des Transports du Québec, 2014; Ministerio de Fomento, 2016).

Les études sur la perception des conducteurs se font principalement à partir de simulateurs de conduite, puisqu'ils permettent de proposer virtuellement n'importe quel scénario ou aménagement routier et de tester les effets de la route sur le comportement du conducteur, tel que la vitesse adoptée, la trajectoire, l'accélération et la décélération (Bella, 2015; Easa & Ganguly, 2005). Bella (2015) a étudié différentes combinaisons de courbes horizontales et verticales sur les vitesses pratiquées de conducteurs, dont la combinaison « critical sag ». Selon cette combinaison, la courbe horizontale commence lorsque la courbe verticale rentrante (à creux) se termine. Le comportement du conducteur est mesuré selon la réduction maximale de sa vitesse, qui est la différence entre la vitesse à 200 m de la tangente à l'approche de la courbe et la vitesse au milieu de la courbe horizontale. Elle a observé une réduction maximale de sa vitesse significative de 5,5 km/h plus élevée que la courbe de référence. L'étude souligne les erreurs de perception en raison de l'alignement de la route et valide les guides de conception en ce qui a trait au type de configuration à éviter.

2.3.3 Environnement routier

L'environnement routier désigne les propriétés du milieu de la route et de ses abords. L'environnement immédiat de la route affecte également la perception et le comportement des conducteurs. Deux caractéristiques reliées à ce facteur sont abordées plus en détail : la densité d'accès et la présence d'arbres et de végétations.

2.3.3.1 Densité d'accès

La densité d'accès est un ratio du nombre de points d'accès par unité de distance (mile ou kilomètre). Un point d'accès peut être une entrée (résidentielle, commerciale, industrielle, institutionnelle, etc.) ou une intersection. Ces points d'accès introduisent des conflits et de la friction dans la circulation (Gluck, Levinson, & Stover, 1999). La densité d'accès est mesurée différemment d'une étude à l'autre et certains types de points d'accès ne sont pas inclus dans toutes les études, ce qui complexifie la comparaison des observations. Saxena (2010) a comparé trois méthodes pour calculer la densité d'accès et elle a proposé une méthodologie de pondération des accès pour standardiser les recherches futures. La pondération se fait selon la géométrie du point

d'accès. Pour chacune des géométries possibles, le nombre de points de conflits (divergence, convergence, croisement et entrecroisement) a été compté, puis un poids lui a été attribué. Ainsi, plus le nombre de points de conflits est élevé, plus la pondération est élevée.

Bien que le calcul de la densité d'accès soit différent d'une étude à l'autre, plusieurs études ont démontré que le taux de collisions augmente avec l'augmentation du nombre de points d'accès ou de la densité d'accès (AASHTO, 2004; Elvik, Rune, 2017; Gluck et al., 1999). Évidemment, un plus grand nombre de collisions ne signifie pas que la gravité de ces collisions sera plus importante. La figure 2.3 illustre les indices du taux de collisions selon le nombre de points d'accès, calculés à partir d'un échantillon de 37 500 collisions (Gluck et al., 1999). Ce ratio permet la comparaison des taux de collisions selon un référentiel, qui est pour ce cas d'étude, le taux de collisions à 10 points d'accès par mile. Ces indices suggèrent, entre autres, qu'une augmentation de 10 à 20 points d'accès par mile augmenterait le taux de collisions de 30 %.

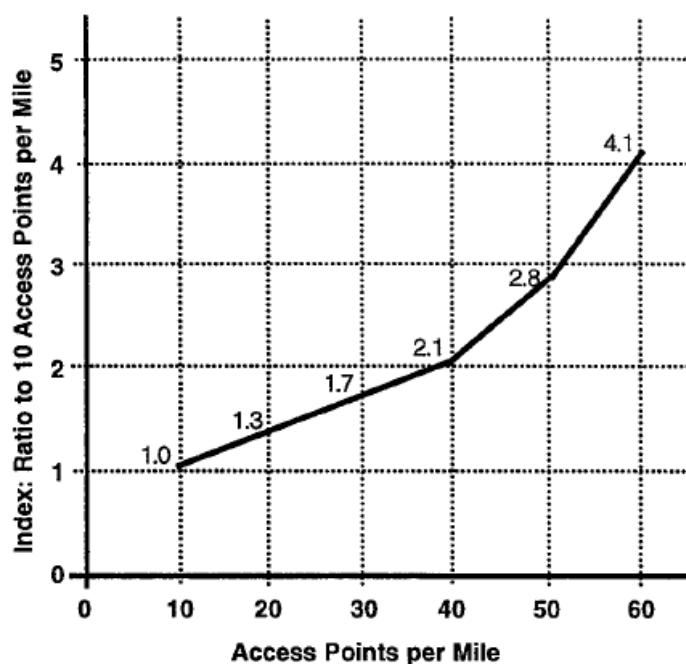


Figure 2.3 : Indices du taux de collisions (ratio du taux de collisions sur le taux de collisions à 10 points d'accès) selon le nombre de points d'accès (Gluck et al., 1999)

Ensuite, Fitzpatrick, Carlson, Brewer et Wooldridge (2003) ont trouvé une relation forte entre la densité d'accès et le 85^{ème} centile des vitesses pratiquées. Les vitesses élevées sont associées à une petite densité d'accès.

2.3.3.2 Présence d'arbres et de végétations

L'environnement naturel a des effets psychologiques positifs sur les usagers de la route, tels que la réduction du stress (Parsons, Tassinary, Ulrich, Hebl, & Grossman-Alexander, 1998), la réduction de la colère et une plus grande tolérance à la frustration (Cackowski & Nasar, 2003). Qu'en est-il des effets de l'environnement sur la conduite ? Naderi, Kweon et Maghelal (2008) ont évalué l'effet de la présence d'arbres sur le comportement de conduite des automobilistes sur un petit échantillon de 31 volontaires. Les chercheurs ont constaté que tous les conducteurs, rapides ou lents, ont diminué leur vitesse en présence d'arbres, comparativement à la même configuration de route mais sans arbres. En moyenne, la vitesse pratiquée individuelle des participants a significativement diminué de 4,9 km/h en milieu périurbain avec la présence d'arbres. Malgré ces bénéfices, les arbres présentent un danger pour les automobilistes lorsqu'ils se trouvent à proximité de la route. Selon des données de collisions de 2002, aux États-Unis, les collisions avec un arbre représentent 1,9 % des collisions reportés, et 46 % de ces collisions sont graves ou mortelles (Wolf & Bratton, 2006). D'après cette même étude, les collisions avec un arbre sont les collisions avec un objet fixe les plus mortelles.

2.3.4 Autres caractéristiques

D'autres caractéristiques, qui ne sont pas un élément géométrique de la route ni un élément de l'environnement routier, peuvent également affecter la sécurité routière. Cette section s'attarde sur deux principales caractéristiques : le milieu routier et la classification de la route.

2.3.4.1 Milieu

Selon une étude de Fitzpatrick et al. (2003), il a été observé qu'un pourcentage plus élevé de véhicules excédait les limites de vitesse en milieu périurbain et urbain qu'en milieu rural. En effet, l'étude a démontré que le 85^{ème} centile de la vitesse pratiquée (V85) était sous la limite de vitesse dans 37 à 64 % des cas pour les routes rurales et dans 23 à 52 % des cas pour les routes périurbaines.

et urbaines. Le pourcentage de véhicules respectant la limite de vitesse est plus élevé en milieu rural.

Litman et Fitzroy (2018) ont trouvé une relation linéaire entre le nombre de décès par habitant et le nombre de miles parcourus en voiture dans les milieux urbain et rural. Ainsi, plus le nombre de miles parcourus augmente, plus le nombre de décès par habitant augmente, également, le nombre de décès augmente plus rapidement en milieu rural. Par exemple, pour une augmentation de 1 % du nombre de miles parcourus, le nombre de décès augmente de 1 % en milieu urbain et de 1,5 % en milieu rural. Le taux de collisions tend à augmenter en milieu urbain en raison du nombre plus élevé d'interactions entre les différents usagers de la route, mais la gravité de collision est, en général, moins importante en milieu urbain qu'en milieu rural, puisque la vitesse des véhicules est moins élevée (Litman & Fitzroy, 2018).

2.3.4.2 Classification de la route

Le réseau routier du Québec est divisé en six classes et suit la hiérarchie suivante : les autoroutes, les routes nationales, les routes régionales, les routes collectrices, les routes locales et les routes d'accès. La classification routière du Québec suit le même système que d'autres provinces canadiennes et que les États-Unis. La fonction d'une route nationale ou régionale est de relier les grandes et les moyennes villes entre elles, ce qui attire en général les déplacements de longue distance. La route collectrice relie les petites villes aux artères et la route locale a pour fonction de rendre accessibles les propriétés et les fermes. La classification des routes se fait selon deux considérations, soit l'accès et la mobilité (AASHTO, 2004).

En général, les classes de route ont des caractéristiques géométriques différentes. Par exemple, les autoroutes et les routes à accès contrôlés (*controlled access road*) ont une séparation centrale et des garde-corps, et les routes locales n'ont, généralement, aucun marquage au sol, du stationnement en bordure de route et beaucoup d'accès (Fitzpatrick et al., 2003). Les autoroutes sont associées à des vitesses plus élevées que les routes locales. La distinction entre les deux classes extrêmes est simple, toutefois, les classes intermédiaires sont plus difficiles à distinguer. Fitzpatrick et al. (2003) ont observé pour des routes locales ayant des caractéristiques semblables (ex. pas de marquage, stationnement sur rue, deux voies) ont un grand intervalle du 85^{ème} centile des vitesses pratiquées entre 26 et 42 mph (41,9 et 67,6 km/h). Cette observation indique que pour une même classe de route et un même groupe de caractéristiques, les conducteurs se comportent différemment.

2.4 Méthodes de collecte des données de vitesse temporaires pour les véhicules motorisés

Le gouvernement et les villes sont appelés à prendre des décisions importantes, telles que le choix des limites de vitesse et la signalisation. Des données précises sur le trafic sont, donc, essentielles pour appuyer leurs décisions. Malheureusement, il n'existe pas de technique et d'équipement parfaits pour mesurer la vitesse. Il peut y avoir une certaine discordance entre les données recueillies et les données réelles (Adnan, Sulaiman, Zainuddin, & Tuan Besar, 2013). Le choix de la méthode de collecte exige de connaître l'ampleur du projet, la qualité des données nécessaire, le temps disponible et le budget alloué. Les méthodes se divisent en deux grandes catégories : manuelle et automatique. Également, plusieurs capteurs requièrent une installation sous ou dans la chaussée, tels que les boucles électromagnétiques, les capteurs piézo-électriques et les capteurs magnétiques. Ces capteurs sont utilisés pour des collectes permanentes. Des méthodes automatiques non intrusives et/ou rapides d'installation sont priorisées dans la collecte de données temporaires : les tubes pneumatiques, les capteurs radar, les capteurs à infrarouge, les capteurs acoustiques et la détection par image vidéo. Plusieurs de ces capteurs peuvent également être installés de façon permanente.

2.4.1 Méthode manuelle

La méthode manuelle la plus commune consiste à mesurer le temps que prend un véhicule pour parcourir une certaine distance à l'aide d'un chronomètre. Pour ce faire, un observateur doit enclencher le chronomètre lorsque le véhicule passe par le point de départ et arrêter le chronomètre au moment où le véhicule passe par le point d'arrivée. La méthode peut rapidement se complexifier lorsque le débit de circulation est élevé, lorsqu'il y a plusieurs directions ou plusieurs voies à étudier à la fois. Elle est donc très coûteuse en termes de main d'œuvre lorsqu'il y a beaucoup de données de vitesse à collecter. De plus, l'erreur de perception de l'humain peut affecter les résultats de vitesse obtenus.

2.4.2 Tubes pneumatiques

Cette technique consiste à placer des tubes de caoutchouc sur les voies, perpendiculairement à la circulation. Les tubes sont reliés à un capteur sur le bord de la route, qui détecte la différence de

pression lorsqu'un véhicule passe. Pour mesurer la vitesse, deux tubes sont nécessaires et la distance entre les deux tubes doit être mesurée avec précision. Lorsque les deux tubes sont installés, le système identifie le moment précis où il y a eu un changement de pression pour chaque tube. La différence de temps et la distance entre les tubes permettent de calculer la vitesse des véhicules captés. Cette méthode permet le comptage des véhicules, la mesure de vitesse, la classification et la détection du sens de circulation des véhicules (Ministry of Works and Transport, 2004). Par contre, l'efficacité de cette technologie est affectée lorsqu'il y a des mauvaises conditions climatiques (Leduc, 2008).

2.4.3 Pistolet laser (pistolet lidar)

Le pistolet laser ou le pistolet lidar est utilisé pour détecter la vitesse et la distance du véhicule ciblé par émission d'une série d'impulsions de lumière infrarouge. Le temps de réflexion (aller-retour) de la lumière est mesuré. Lorsqu'il est bien programmé, le pistolet laser peut bien fonctionner dans différentes conditions climatiques (Adnan et al., 2013). Comparativement au pistolet radar, le pistolet laser a un champ de vision plus étroit, ce qui limite la zone ciblée : cela implique qu'il y a moins de confusion sur le véhicule lors de la mesure de la vitesse.

2.4.4 Capteur radar

Les capteurs radar fonctionnent sur le principe de Doppler. Une onde électromagnétique est émise par une antenne radar en direction d'un véhicule. Lorsque l'onde entre en contact avec le véhicule, elle est réfléchi vers le récepteur du capteur. La vitesse est mesurée selon le changement de fréquence entre l'émission et la réception de l'onde. La position du véhicule est estimée selon le temps de retour du signal. Le capteur peut également estimer la longueur du véhicule. Cette méthode de collecte est insensible au mauvais temps et elle permet la détection sur plusieurs voies de circulation. Toutefois, les radars à onde continue ne détectent pas les véhicules à l'arrêt (Klein, Mills, & Gibson, 2006).

2.4.5 Capteur à infrarouge (actif et passif)

Les capteurs infrarouges (IR) reposent sur un rayonnement électromagnétique ayant une longueur d'onde supérieure à celle du spectre visible, mais plus petite que celle des micro-ondes. Les capteurs à infrarouge comportent deux groupes : les capteurs IR actifs et les capteurs IR passifs.

1. Les capteurs IR **actifs** sont basés sur le principe de l'émission et de la réception d'une onde. L'émetteur est une diode électroluminescente (DEL) qui émet un faisceau lumineux en dehors du spectre visible. Ces capteurs permettent, également, de mesurer la position et la hauteur des véhicules à l'endroit où le capteur est placé.
2. Les capteurs IR **passifs** détectent la chaleur émise par tous corps ayant une température au-dessus de zéro Kelvin. La chaleur dégage une énergie sous forme d'ondes électromagnétiques qui est invisible pour l'œil humain. Également, ces capteurs peuvent détecter l'énergie émise par l'atmosphère et réfléchiée par tous objets, ce qui donne une image qui inclut la présence de voitures, la possibilité d'effectuer des comptages et de mesurer des vitesses, notamment à partir de capteurs passifs multizones.

L'efficacité de ces capteurs peut être affectée par une mauvaise visibilité telle que le brouillard et la poudrierie (Klein et al., 2006).

2.4.6 Capteur acoustique (actif et passif)

Les capteurs acoustiques utilisent les ondes sonores pour obtenir plusieurs informations sur l'environnement. Ils sont divisés en deux groupes : les capteurs acoustiques actifs et les capteurs acoustiques passifs.

1. Les capteurs acoustiques **actifs** sont aussi connus sous le nom de capteurs à ultrasons. Le capteur à ultrasons est composé d'émetteurs et de récepteurs à ultrasons. La fréquence des ultrasons est trop élevée pour être perçue par l'oreille humaine. L'émetteur envoie une série d'impulsions en direction de la chaussée. Ce signal est réfléchi par les objets et dirigé vers le récepteur du capteur. Le temps de parcours permet de détecter le passage du véhicule, de faire des comptages et de déterminer la forme de l'objet (longueur, hauteur, largeur), ce qui permet la classification du véhicule.
2. Les capteurs acoustiques **passifs** détectent les sons audibles de la circulation pour identifier la présence ou l'absence de véhicules dans une zone. Pour avoir des mesures plus précises sur le comptage, la classification et les vitesses pratiquées, plusieurs capteurs acoustiques passifs doivent être installés à intervalle régulier au bord de la route. Le traitement de ces signaux est complexe et il n'est pas efficace dans le trafic dense (Klein et al., 2006).

La performance de ces capteurs peut être affectée par les mauvaises conditions climatiques, telles que la neige et le froid (Leduc, 2008).

2.4.7 Caméra vidéo

Les systèmes de traitement d'images vidéo reposent sur des méthodes de vision par ordinateur pour recueillir des données de circulation. Ces méthodes de collecte nécessitent une ou plusieurs caméras et un logiciel de reconnaissance et de suivi des usagers de la route pour analyser, interpréter et convertir les images en données de trafic (Klein et al., 2006). Cette technologie est continuellement en évolution pour, éventuellement, être capable d'automatiser l'analyse du traitement d'images vidéo en temps réel. Ces systèmes permettent d'extraire de nombreuses données selon l'utilisation désirée. Il est possible d'extraire des données de comptage, de classification, de vitesse et de position. Par ailleurs, cette technologie permet d'extraire des données sur une zone spatiale étendue et d'identifier des événements comme des conflits entre usagers, des collisions et d'autres incidents qui pourraient se produire dans la circulation. Les capteurs vidéo sont sensibles aux conditions climatiques (Leduc, 2008).

2.5 Système de détection et suivi des objets par images vidéo

Ces systèmes font partie des systèmes de transport intelligent (STI) et sont utilisés, entre autres, pour surveiller automatiquement le trafic sur les routes. La difficulté principale de ce type de système est d'isoler les objets dans les images vidéo, c'est-à-dire d'extraire les données d'objet. L'extraction d'objets se fait généralement en deux principales étapes : la détection ou segmentation des objets et le suivi des objets (Cavallaro, Steiger, & Ebrahimi, 2005). La segmentation consiste à identifier les objets et à les séparer du reste de l'image. Le suivi vise à repérer les objets identifiés et à actualiser leurs coordonnées pour chacune des images du vidéo. Les algorithmes de détection et de suivi des objets doivent être robustes afin d'assurer un suivi continu des objets. Il existe cinq approches de suivi des objets, en plus des méthodes hybrides qui consistent à combiner des approches.

- 1) Le suivi basé sur **les modèles** (*model-based*) exploite la connaissance a priori des dimensions des objets typiques d'un endroit (Koller, Daniilidis, & Nagel, 1993).

- 2) Le suivi basé sur **l'apparence** (*appearance-based* ou *region-based*) vise à identifier des régions/ tâches dans l'image qui sont associées à un objet (Saunier & Sayed, 2006).
- 3) Le suivi basé sur **des détecteurs d'objet** (*object-based detection*) utilise des techniques d'apprentissage machine (images) pour détecter les usagers en mouvement (Schilling, Bulatov, & Middelmann, 2018).
- 4) Le suivi basé sur **le contour** (*contour-based*) consiste à détecter le contour des objets en mouvant en l'adaptant pour les images suivantes.
- 5) Le suivi basé sur **les points d'intérêt** (*feature-based*) vise à détecter plusieurs points d'un objet puis à les grouper par objet (Saunier & Sayed, 2006).

Ces différentes approches de suivi des objets ont leurs avantages et leurs inconvénients. Le choix de l'approche dépend de l'utilisation et de la performance souhaitée. Les sous-sections suivantes présentent des exemples d'application à la circulation motorisée et non motorisée de ces systèmes de vision par ordinateur.

2.5.1 Applications à la circulation motorisée

Les systèmes de vision par ordinateur permettent d'obtenir de nombreuses informations en ce qui a trait au trafic routier, plus précisément à la circulation motorisée. Il est possible d'utiliser les caméras de surveillance déjà en place pour collecter et traiter automatiquement des données, telles que les vitesses, les débits et la densité de trafic. Comparativement à la plupart des autres capteurs, l'analyse vidéo permet de détecter des phénomènes spatiaux, tels que la distance entre des objets, le positionnement latéral d'un usager et l'évolution des vitesses dans l'espace.

Vitesses

Sochor et al. (2018) ont étudié la méthode de calibration de la caméra afin de mesurer la vitesse des véhicules à l'aide d'une seule caméra. Environ 18h de données vidéo ont été collectées sur un total de six emplacements. Pour chaque emplacement, trois angles de caméra ont été évalués, soit à gauche, au centre et à droite. Deux appareils LIDAR ont été installés perpendiculaires à la route et ont été distancés de 28 m. Ces appareils ont permis la détection et la mesure comparative de la vitesse des véhicules. Ils ont comparé plusieurs systèmes et le plus performant (OptCalib) a obtenu une erreur moyenne de mesure de la vitesse de 1,81 %, ce qui représente une erreur de 1,43 km/h.

Anderson-Trocme, Stipancic, Miranda-Moreno et Saunier (2015) ont évalué l'erreur de mesure de la vitesse des véhicules de l'outil vidéo selon trois orientations de la caméra, et ce pour deux sites. L'orientation perpendiculaire à la route obtient des mesures de vitesse plus précises comparée à la caméra positionnée parallèlement à la route (en bordure de route). De plus, en minimisant la distance entre l'objet et la caméra, la précision de la mesure de la vitesse augmente.

Distances et positions

Ali et Hussein (2016) présentent une approche d'estimation des distances et une approche de détection de la position des véhicules à partir d'une caméra embarquée (dans le véhicule). L'estimation de la distance entre deux véhicules suiveurs peut s'avérer pertinente dans les systèmes d'arrêt automatique de véhicule en cas de situations potentiellement dangereuses. Leur système d'estimation des distances a une erreur moyenne de 9,71 % et leur système de positionnement des véhicules a une erreur moyenne de 7,27 %.

Collisions

Yu, Zhang, Chen et Hauptmann (2018) ont développé un modèle de reconnaissance du danger du trafic à l'aide de caméras de surveillance. Il s'agit d'un modèle basé sur une reconstruction 3D de la route en plan et sur les prédictions des trajectoires des véhicules. Le modèle permet l'identification et la prédiction des collisions de véhicules sans l'utilisation de données d'apprentissage. Le système permet un contrôle proactif des vitesses et des distances entre les véhicules en temps réel pour identifier des zones à haute probabilité de collision. La probabilité de collision repose sur l'accumulation des positions des véhicules et non la mesure d'événements observés entre les usagers, comme des conflits. Les erreurs sur les mesures sont de 1,8 % pour la distance et de 2,77 km/h pour la vitesse. Pour ce qui est des erreurs de prédiction du modèle, l'erreur de positionnement du véhicule est de 0,24 m et celle de la vitesse est de 2,53 km/h.

2.5.2 Applications à la circulation non motorisée

Tout comme la circulation motorisée, l'utilisation d'un système de vision par ordinateur pour détecter et suivre les piétons et les cyclistes peut être avantageuse. Les données d'activités sont principalement collectées aux intersections puisque ce sont les points du réseau les plus complexes et les plus risqués. Il est possible d'obtenir automatiquement des données de débit, de vitesse et de trajectoire dans le temps et l'espace (Zangenehpour, Sohail, Miranda-Moreno, & Saunier, 2015).

Ces données permettent de mieux aménager la route, planifier les déplacements, concevoir le phasage des feux de circulation et évaluer le niveau de service.

Comportement des cyclistes

Zaki, Sayed et Cheung (2013) ont évalué le comportement des cyclistes à partir d'un système de vision par ordinateur. Ils ont observé les cyclistes sur un site à l'aide d'une seule caméra. Au total, ils ont compté 753 cyclistes et leur vitesse moyenne était de 14 km/h. Le système a permis de recueillir de nombreuses informations sur les cyclistes, telles que le débit, la vitesse, la trajectoire et le port du casque. Selon l'étude, plusieurs facteurs affectent significativement le comportement des cyclistes, dont la taille du groupe, le trajet du déplacement, la position sur la voie et le port du casque. Ils ont trouvé que la vitesse moyenne des cyclistes circulant sur la route était supérieure à celle des cyclistes empruntant le trottoir. Par ailleurs, la vitesse moyenne était plus faible pour les cyclistes ne portant pas leur casque et pour les cyclistes circulant en groupe.

Comportement des piétons

Hussein, Sayed, Reyad et Kim (2015) ont évalué le comportement des piétons à une intersection signalisée à débit élevé de piétons à New York (une station de métro est localisée à l'intersection) à partir d'un système de vision par ordinateur. Au total, 2 h de données vidéo ont été collectées et 333 piétons ont été analysés. Selon l'étude, le facteur qui contribue au plus grand nombre de conflits entre un véhicule et un piéton est le non-respect des règles de la route par les piétons. Un tiers des piétons observés ne respectait pas la signalisation pour piétons. Le système a également extrait automatiquement la vitesse, la fréquence des pas et la longueur des pas pour les 333 piétons. Il a été trouvé que la vitesse moyenne des piétons était de 1,47 m/s, la fréquence de pas moyenne était de 1,96 Hz et la longueur de pas moyenne était de 0,75 m. De plus, la vitesse des piétons seuls est 9 % plus élevée que celle des piétons circulant en groupe.

2.6 Vue d'ensemble sur la sécurité des cyclistes en route partagée

Le cyclisme a considérablement évolué depuis le début des années 2000 en Amérique du Nord (Pucher, Buehler, & Seinen, 2011). Plusieurs infrastructures ont été ajoutées aux réseaux cyclables et plusieurs programmes ont été adoptés pour encourager les gens à se déplacer à vélo à des fins utilitaires ou de loisir. Le nombre croissant de cyclistes sur les réseaux routiers et cyclables apporte une préoccupation importante au niveau de la sécurité des cyclistes. Plusieurs villes ont modifié

les limites de vitesse, mis des routes à sens unique, changé le phasage des feux, etc. Certaines villes ont même implanté des pistes cyclables avec une séparation physique ou tout simplement ajouté une voie cyclable à la route, dans l'optique de rendre les déplacements des cyclistes plus sécuritaires. Toutefois, peu d'études ont investigué l'effet de ces solutions sur la sécurité.

2.6.1 Méthodes d'évaluation de la sécurité

Plusieurs méthodes d'évaluation de la sécurité des cyclistes sont employées pour identifier des situations ou des lieux dangereux, identifier des caractéristiques de la route problématiques et identifier des comportements non désirés. Parmi ces méthodes, quatre types de données sont fréquemment utilisées, soit les données historiques de collisions, les données GPS, les données vidéo ou les données d'observation directe sur le terrain.

L'approche traditionnelle est basée sur les données historiques de collisions provenant des rapports de police ou des interventions des ambulanciers (Strauss, Zangenehpour, Miranda-Moreno, & Saunier, 2017). Plusieurs études ont examiné les facteurs affectant l'occurrence des collisions de cyclistes (Elvik, R., 2009; Jacobsen, 2003; Wang & Nihan, 2004). Certaines études ont tenté d'utiliser des modèles, tels que le modèle Bayésien, pour identifier les intersections risquées selon différentes variables comme les conditions de circulation et la conception géométrique de la route (Brüde & Larsson, 1993; Strauss, Miranda-Moreno, & Morency, 2014). Cette méthode est connue pour avoir une limitation importante : des collisions impliquant des cyclistes doivent se produire pour évaluer la sécurité. Il s'agit d'une méthode réactive.

Ensuite, d'autres études se sont concentrées sur les vitesses, les accélérations, les décélérations, les délais et les temps de parcours pour évaluer la sécurité des cyclistes à partir de données GPS provenant des téléphones intelligents (Dang, Kubo, Sato, Yamaguchi, & Namatame, 2014; Strauss et al., 2017). Dang et al. (2014) ont évalué le comportement de freinage des conducteurs et des cyclistes le long de segments routiers. Strauss et al. (2017) ont étudié la relation entre les collisions rapportées et les événements de décélération survenus aux intersections et le long des segments routiers. La mesure de sécurité utilisée dans cette étude est le taux de décélération (DR).

Les recherches récentes explorent l'utilisation des données vidéo pour analyser automatiquement la sécurité des cyclistes (Kassim, Ismail, & Hassan, 2014; Sayed, Zaki, & Autey, 2013; Zangenehpour, S., Strauss, Miranda-Moreno, & Saunier, 2016). Des indicateurs ont été développés

pour évaluer la sécurité et les interactions entre les usagers, dont le temps à la collision (TTC : *time to collision*), le temps post-empiétement (PET : *post encroachment time*), l'intervalle de temps (GT : *gap time*) et le taux de décélération (DR : *deceleration rate*) (Strauss et al., 2017). Zangenehpour, S. et al. (2016) et Kassim et al. (2014) ont utilisé une méthode automatique afin de mesurer le temps post-empiétement (PET) comme indicateur d'analyse des interactions entre les cyclistes et les véhicules aux intersections. Sayed et al. (2013) ont évalué la sévérité des interactions entre véhicule-cycliste à partir de l'indicateur du temps de collision (TTC). Les études ont démontré l'efficacité de ces systèmes de détection par ordinateur à partir d'images vidéo pour évaluer la sécurité des interactions entre les différents usagers de la route.

2.6.2 Facteurs de risque dans les collisions impliquant les cyclistes

Le vélo est reconnu comme un mode de déplacement essentiel au système de transport actuel. Il est bénéfique pour la santé, non polluant et permet de se déplacer rapidement en ville (Ville de Montréal, 2008). Selon une étude de 2011, Montréal possédait un des plus grands réseaux cyclables en Amérique du Nord et le plus grand système de vélo-partage (Pucher et al., 2011). En plus de connaître une augmentation de popularité, le vélo est plus sécuritaire qu'auparavant en raison, entre autres, de l'ajout de voies cyclables et de l'éducation des usagers. Selon cette étude de Pucher et al. (2011), entre 1988 et 2008, des diminutions de 66 % de mortalité et de 40 % du nombre de blessés graves chez les cyclistes au Canada ont été observées. Malgré ces progrès, le risque de collisions à vélo est toujours présent. En 1995, le nombre de décès de cyclistes était 11 fois plus élevé que le nombre de décès lié à la voiture par kilomètre parcouru aux États-Unis (Pucher & Dijkstra, 2000).

Ce constat nous amène à identifier les facteurs de risque dans les collisions impliquant les cyclistes. Le risque de collisions est défini par la probabilité d'occurrence d'une collision et la gravité des blessures. En milieu rural, l'aménagement routier est souvent peu adapté à l'usage du vélo et les limites de vitesse sont généralement plus élevées qu'en milieu urbain. Une augmentation des vitesses ou du débit de circulation de véhicules occasionne une diminution du nombre de cyclistes (Jacobsen, Racioppi, & Rutter, 2009) et une augmentation d'occurrence des blessures chez les cyclistes et les piétons (Strauss et al., 2014). Par ailleurs, les carrefours et les intersections sont les éléments du réseau les plus risqués pour les cyclistes. Ce sont des zones complexes puisque plusieurs interactions entre les véhicules motorisés, les cyclistes et les piétons y surviennent. À

Montréal, il a été observé qu'environ 60 % des collisions avec blessures chez les cyclistes se sont produits à une intersection (Strauss, Miranda-Moreno, & Morency, 2013).

CHAPITRE 3 CHANGEMENT DE LIMITES DE VITESSE ET CARACTÉRISTIQUES DE LA ROUTE

L'implantation d'une nouvelle limite de vitesse n'a pas toujours l'effet escompté, ce qui complexifie la tâche des ingénieurs pour assurer la sécurité des routes et maintenir la mobilité sur le réseau routier. Le choix de la vitesse à adopter par le conducteur est influencé par plusieurs facteurs externes tels que la conception géométrique de la route et les conditions de la circulation. Le comportement des conducteurs est, également, affecté par des facteurs cognitifs de l'automobiliste comme la perception, le raisonnement et le jugement moral (Warner & Aberg, 2008). Plusieurs experts ont tenté d'identifier et comprendre les facteurs affectant le comportement des conducteurs. La relation complexe entre la vitesse pratiquée d'un conducteur et certains facteurs est illustrée à la figure 3.1.

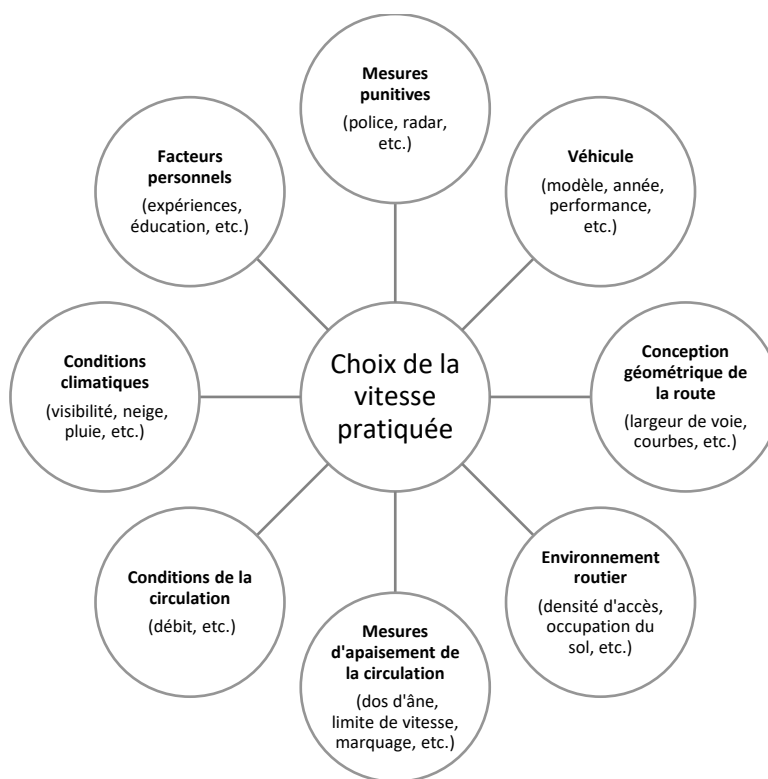


Figure 3.1 : Facteurs affectant le choix de la vitesse pratiquée du conducteur

Parmi tous ces facteurs présentés, trois éléments sont abordés dans cette section : les limites de vitesse, les caractéristiques géométriques et l'environnement routier. L'objectif est de comprendre

et de quantifier l'effet de ces facteurs sur le comportement des conducteurs. Cette analyse tente d'apporter des réponses et des explications scientifiques à ces deux questions :

1. Comment les conducteurs se comportent face à un changement de limite de vitesse, aux caractéristiques géométriques de la route et à l'environnement routier au Québec ?
2. Est-ce que les limites de vitesse sont adaptées aux caractéristiques de la route et à l'environnement immédiat ?

Pour bien répondre à ces questionnements, le chapitre est divisé en quatre grands thèmes : la méthodologie, la présentation des sites, l'analyse des données et la synthèse des résultats.

3.1 Méthodologie

La méthodologie se divise en cinq parties : la première présente l'inventaire de la base de données spatiale qui a servi aux analyses; la deuxième énumère les critères de sélection des sites à l'étude; la troisième présente la procédure de collecte de données au terrain; la quatrième décrit le traitement et le filtrage effectués sur les données de comptage et la cinquième présente les méthodes d'analyse.

3.1.1 Inventaire de la base de données spatiale

Le MTQ possède plusieurs systèmes de données pour inventorier de nombreuses informations sur son réseau routier, dont les suivants :

- Gestion des limites de vitesse (GLV);
- Adresses Québec (AQ);
- Informations sur la circulation routière (CIR);
- Inventaire des infrastructures de transports (IIT).

Pour ce projet, le Ministère a fourni différents jeux de données du réseau routier du Québec. Ces données spatiales ont permis d'identifier les endroits sur le réseau où il y a eu un changement de limite de vitesse et de récupérer certaines caractéristiques de la route. Le tableau 3.1 présente les couches de données géospatiales utilisées, ainsi qu'une petite description du type d'informations que peut contenir la couche.

Tableau 3.1 : Liste des couches de données géospatiales utilisées

Nom de la couche	Description des données	Nombre de lignes
<i>AQParcours</i>	Identification du réseau routier québécois par Adresses Québec (<i>classification fonctionnelle, vitesse affichée, direction, etc.</i>)	463 132
<i>GLVLimitedevitesse_1</i>	Inventaire des limites de vitesse prescrites (<i>longueur de la zone de vitesse, date d'application, limite de vitesse affichée, limite de vitesse antérieure, etc.</i>)	8 340
<i>Compteurs</i>	Liste des compteurs du MTQ (<i>capteur, date de création, etc.</i>)	5 772
<i>CIRSectiondetrafic_1</i>	Informations sur la circulation aux endroits où il y a eu un comptage (<i>DJMA, DJME, DJMH, etc.</i>)	7 932
<i>IITterreplein</i>	Description des terre-pleins (<i>type, longueur, etc.</i>)	7 568

Les couches principales du projet sont *GLVLimitedevitesse_1* et *Compteurs*. La couche *Compteurs* est la localisation de tous les compteurs installés sur le réseau du MTQ. Ces compteurs sont des capteurs permanents ou temporaires installés sur ou sous la chaussée pour mesurer, entre autres, la vitesse des véhicules. La couche *GLVLimitedevitesse_1* est un répertoire de toutes les routes du MTQ divisées par segment, selon la limite de vitesse. Cette couche permet de connaître des informations sur les changements de limite de vitesse s'il y a eu lieu. Toutes les données spatiales pertinentes au projet ont été ajoutées à la couche *Compteurs*, pour obtenir une seule couche de travail. Ainsi, pour chacun des compteurs, il est possible d'avoir plusieurs informations, dont la limite de vitesse à cet endroit, le type de route, le sens de la circulation et le nombre de voies. Le logiciel SIG utilisé pour les manipulations des couches de données est QGIS disponible sous une licence libre. À partir de la couche de travail, une sélection a été faite pour conserver uniquement les compteurs pertinents à l'étude. Ces critères de sélection sont décrits à la section suivante.

3.1.2 Critères de sélection des sites

Un site est un segment de route caractérisé, entre autres, par une limite de vitesse, un DJMA et une longueur de zone de vitesse. Une zone de vitesse est caractérisée par une même limite de vitesse. Une même route peut posséder plusieurs limites de vitesse et donc, plusieurs zones de vitesse. Des critères de sélection des sites ont été élaborés pour identifier, dans la couche de travail, des routes intéressantes pour l'étude. Pour répondre aux objectifs, les sites ont été séparés en trois groupes :

- **Groupe cas-1** : sites cas (changement de limite de vitesse entre 2006 et 2013)
- **Groupe cas-2** : sites cas (changement de limite de vitesse entre 2013 et 2017)
- **Groupe témoin** : sites témoins (aucun changement de limite de vitesse)

Les sites cas sont des segments de route ayant eu une modification à la limite de vitesse entre 2006 et 2013 pour le groupe cas-1 et entre 2013 et 2017 pour le groupe cas-2. Les sites cas ont été séparés en deux groupes, puisque des données additionnelles ont été collectées sur le terrain pour les sites du groupes cas-2, soit les sites ayant subi un changement plus récent. Les sites cas peuvent avoir subi une augmentation ou une diminution de la limite de vitesse. Les sites témoins sont des segments de route qui n'ont pas eu de changement de limite de vitesse depuis l'an 2000.

Les critères de sélection des sites sont différents pour chacun des groupes puisqu'ils ont une contribution légèrement variée au projet. Les trois groupes permettent d'évaluer le comportement des conducteurs, selon les limites de vitesse. Le groupe témoin est, également, utilisé pour contrôler l'effet du temps des groupes cas. De plus, les deux groupes cas permettent d'évaluer l'effet des caractéristiques de la route sur le comportement des conducteurs. Pour le groupe cas-2, une visite de terrain a été nécessaire pour obtenir plus d'information sur les caractéristiques de ces sites. Par exemple, la visite de terrain a permis d'obtenir de l'information sur les largeurs de voie et la densité d'accès sur le site. Ainsi, le groupe cas-2 possède plus de caractéristiques de la route que le groupe cas-1, toutefois l'échantillon est plus petit en raison de la collecte de données au terrain qui nécessite beaucoup de temps et de ressources.

3.1.2.1 Groupe cas-1

Le groupe cas-1 représente les sites ayant eu un changement de limite de vitesse moins récent, soit entre 2006 et 2013. Les critères de sélection pour ces sites sont :

1. Un changement de limite de vitesse entre 2006 et 2013 ;
2. Une route sous la responsabilité du MTQ (nationale, régionale ou collectrice) ;
3. La présence d'un compteur du MTQ sur le segment routier ;
4. Aucun radar fixe ou mobile sur le site.

Aucun critère de localisation n'est nécessaire. Les sites retenus peuvent se trouver à n'importe quel endroit au Québec à condition qu'ils respectent les quatre critères énoncés. De ces critères, environ 200 sites ont été retenus. Les données de vitesse et de comptage des capteurs présents sur ces sites ont permis d'éliminer certains sites pour une des deux raisons suivantes :

- le site ne possédait pas de données de vitesse avant et/ou après le changement de limite de vitesse dans la plage considérée ; ou
- les données de vitesse du site étaient jugées « étranges » en raison de distributions de vitesse très différentes dans le temps.

Pour analyser le comportement des conducteurs, le site doit avoir des données de vitesse avant et après la modification de limite de vitesse. Sans ces données, il n'est pas possible d'évaluer l'effet du changement sur les vitesses pratiquées. De plus, pour éviter des résultats aberrants, certains sites ont été éliminés lorsque les distributions de vitesse étaient très différentes pour un même site. Ces deux raisons sont expliquées plus en détails à la section 3.1.4 Traitement et filtrage des données.

3.1.2.2 Groupe cas-2

Le groupe cas-2 représente les sites ayant eu un changement de limite de vitesse récent, soit entre 2013 et 2017. Pour chacun des sites retenus de ce groupe, une collecte de données au terrain est faite pour collecter des caractéristiques de la route supplémentaires à celles disponibles dans la base de données spatiales et pour collecter des données de vitesse récente, après le changement de limite de vitesse. Les critères de sélection pour ces sites sont :

1. Proximité des sites (maximum de 2h de route de Montréal) ;
2. Un changement de limite de vitesse entre 2013 et 2017 ;
3. Une route sous la responsabilité du MTQ (nationale, régionale ou collectrice) ;
4. La présence d'un compteur du MTQ sur le segment routier ;

5. Aucun radar fixe ou mobile sur le site ;
6. Aucun changement à l'environnement routier et du bâti.

Un premier tri a été fait pour exclure tous les segments de route et les compteurs qui sont éloignés de Montréal, étant donné que ces sites demandent une collecte de données au terrain. Ce critère n'est pas une exigence du projet, mais plutôt un critère optionnel pour limiter les déplacements longs vers les sites d'étude. Une limite d'environ de 2 heures de route pour aller, sans congestion, a été retenue. De plus, comme pour les sites du groupe cas-1, aucun radar fixe ou mobile ne doit être présent sur le site, puisque sa présence peut influencer les vitesses pratiquées des conducteurs. De ces critères, environ 39 sites ont été retenus. À partir des données de comptage et de vitesse fournis par le ministère, certains sites ont été éliminés pour la raison suivante :

- le site ne possédait pas de données de vitesse avant le changement de limite de vitesse dans la plage considérée.

Les sites qui ne possèdent pas de données avant le changement ont été éliminés, toutefois, ceux qui n'avaient pas de données après le changement ont été conservés, puisque la vitesse au terrain a permis de collecter des données de vitesse. Des sites restants, une visite de terrain a été faite. Toutefois, deux raisons majeures ont pu empêcher la collecte de données sur ces sites :

- il y avait une entrave à la circulation (présence policière, travaux, etc.) ; ou
- la collecte de données de vitesse était jugée non sécuritaire.

À certains endroits, le débit de véhicule était très important ce qui rendait la collecte de vitesse non sécuritaire. Ces sites ont été éliminés de l'étude.

3.1.2.3 Groupe témoin

Le groupe témoin représente les sites n'ayant subi aucun changement à la limite de vitesse entre 2000 et 2017. Ce groupe de contrôle permet de vérifier s'il y a eu, dans le temps, un changement important du comportement des conducteurs au Québec. Dans le cas où une variation importante des vitesses pratiquées est observée dans le temps, un ajustement doit être fait pour éliminer l'effet du temps sur les résultats. Les critères de sélection pour ces sites sont :

1. Aucun changement de limite de vitesse entre 2000 et 2017 ;
2. Une route sous la responsabilité du MTQ (nationale, régionale ou collectrice) ;

3. La présence d'un compteur du MTQ sur le segment routier ;
4. Aucun radar fixe ou mobile sur le site ;
5. Similarité des caractéristiques avec les sites cas.

3.1.3 Procédure de collecte des données

Comme il a été mentionné précédemment, le groupe cas-2 nécessite une visite de terrain pour collecter des données de vitesse et des données sur les caractéristiques du site. Pour chacun des sites de ce groupe, une collecte de vitesse a été effectuée pour obtenir plus de données que celles disponibles. Les vitesses recueillies, durant la visite de terrain, représentent la période après le changement de la limite de vitesse. Ensuite, pour chacun de ces sites, une collecte des caractéristiques de la route a été faite pour obtenir plus d'informations sur le site, telles que les largeurs de voie et la densité d'accès.

3.1.3.1 Collecte de vitesse

Étant donné le grand nombre de données à recueillir durant une courte période, une méthode automatique et temporaire a été priorisée. Les relevés de vitesse ont été faits à partir des tubes pneumatiques, puisque cette technique est peu dispendieuse et elle permet d'avoir des résultats fiables.

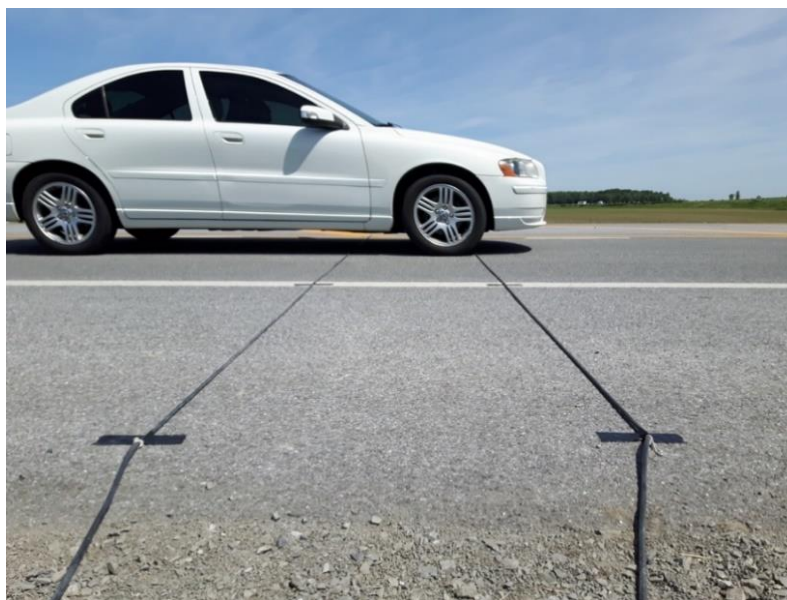


Figure 3.2: Installation des tubes pneumatiques

Lors du passage d'un véhicule, l'air se comprime à l'intérieur du tube ce qui fait varier la pression. Une variation de pression permet au capteur de compter le nombre d'essieux, de classer les véhicules et de mesurer une vitesse à partir de deux tubes. La qualité des données de vitesse recueillies peut, toutefois, être affectée par différents facteurs, dont :

- Les conditions météorologiques;
- L'état de la chaussée;
- Les conditions de circulation;
- L'emplacement des tubes;
- L'installation et la calibration de l'équipement.

Pour éviter tous résultats aberrants, les relevés de vitesse ont été faits durant des conditions normales de circulation, lorsque la chaussée était sèche et lorsque les conditions climatiques étaient normales (pas de précipitation, visibilité normale). Également, l'installation et la calibration de l'équipement se sont faites, selon les recommandations du fabricant.

3.1.3.1.1 Durée des relevés de vitesse

Les relevés de vitesse ont été faits sur une période de 3h consécutive, durant un jour de semaine (lundi à vendredi), entre 9h et 16h, pendant les mois de mai, juin et juillet. Les heures de pointe ont été éliminées de la plage horaire de la collecte, puisque ce sont les vitesses en écoulement libre qui sont étudiées. La durée de la collecte dépend, également, de la qualité et du nombre d'observations enregistrées. Un minimum de 200 véhicules en écoulement libre a été observé pour chacun des relevés de vitesse.

3.1.3.1.2 Emplacement des tubes pneumatiques

Tous les tubes ont été installés approximativement à l'emplacement des compteurs appartenant au MTQ. Les tubes ne devaient pas nuire à la circulation, ils devaient être discrets et installés de façon sécuritaire sur la chaussée. Idéalement, les tubes ont été installés sur un segment routier droit (sans courbes) et loin des intersections. De plus, les tubes pneumatiques devaient être installés sur une chaussée, de préférence, sèche pour une meilleure adhérence.

3.1.3.1.3 Matériel et équipement

L'équipement utilisé pour les relevés de vitesse provient de Counting Cars¹. Leur capteur « WayCount » collecte des données de volume et de vitesse, permet la classification des véhicules et distingue les véhicules provenant des deux directions de la route. La figure 3.3 présente l'équipement utilisé pour les relevés de vitesse et la figure 3.4 illustre le capteur WayCount.



Figure 3.3: Équipements de Counting Cars



Figure 3.4: Capteur WayCount

Le capteur portatif s'installe facilement et rapidement. Les tubes en caoutchouc sont connectés dans les ports A et B de manière à connaître la direction des véhicules. L'installation des tubes pneumatiques se fait selon les instructions du fabricant. Une mauvaise installation peut affecter les résultats. Le relevé de vitesse se programme à partir d'une application développée par Counting Cars. La connexion se fait par Bluetooth à partir d'un téléphone intelligent ou d'une tablette. Une fois l'appareil connecté au capteur, il est possible de programmer les caractéristiques du site et du relevé de vitesse sur l'application mobile. Lorsque le temps du relevé est écoulé, les données sont transférées dans un nuage informatique (Cloud).

¹ Counting Cars: <https://countingcars.com/>

3.1.3.1.4 Données générées

Les capteurs et l'application WayCount permettent de générer deux fichiers csv : le rapport des véhicules et une liste des véhicules.

1. Le **rapport des véhicules** possède plusieurs informations statistiques par direction et pour les deux directions: le volume, la vitesse moyenne, la vitesse du 85^e centile, le pourcentage de camion et le volume en heure de pointe.
2. La **liste des véhicules** représente le passage de tous les véhicules. Le fichier permet de connaître la date et l'heure exacte du passage, la direction, la vitesse, la classe du véhicule et le nombre d'essieu. La classification des véhicules se fait selon le système développé par le FHWA (Federal Highway Administration) ². Les véhicules sont classifiés en 13 groupes selon le nombre d'essieux, la distance entre les essieux, le poids du premier essieu et le poids brut du véhicule.

3.1.3.1.5 Qualité de la collecte (Limitations)

La méthode de tubes pneumatiques possède quelques limitations qui affectent la qualité des données disponibles.

1. Erreur de classification des véhicules

La classification des véhicules peut être complexe. Le capteur WayCount compte le nombre d'essieux et mesure la distance entre les essieux pour chaque véhicule. Ces informations lui permettent d'estimer la classe. La classification peut faire défaut, principalement, lorsqu'il y a deux véhicules et plus qui se suivent de près ou lorsqu'un véhicule possède une remorque.

2. Véhicules non observés

Le comptage se fait à partir de la différence de pression dans les tubes. Lors du passage de deux véhicules au même instant (même direction ou direction opposée), le capteur fait défaut, puisqu'il peut détecter, uniquement, un véhicule à la fois. Un passage simultané de

² Classification: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/ltp/13091/002.cfm>

deux véhicules peut fausser le temps de passage aux tubes et par conséquent, rendre inexacts les données de vitesse et de classification.

3. Véhicules légers non détectés

Certains véhicules légers ne sont pas détectés par le capteur, comme les bicyclettes. Étant donné que les tubes pneumatiques fonctionnent à partir de la pression de l'air, une faible pression peut rendre la détection presque impossible pour le capteur. Plus l'endroit de passage sur le tube est éloigné du capteur, moins bien sera la détection. Ainsi, un véhicule léger qui circule dans la voie la plus éloignée du capteur sera moins bien détecté qu'un véhicule léger qui circule près du capteur.

3.1.3.2 Collecte des caractéristiques de la route

Lors des visites sur le terrain, une grille d'observation a été remplie pour chacun des sites afin d'obtenir des caractéristiques supplémentaires à la base de données. Cette grille d'observation est subdivisée en quatre grandes catégories : les conditions climatiques au moment du relevé, la localisation du relevé, l'identification du site et les caractéristiques de la zone. La grille complète est disponible à l'annexe A. Les listes suivantes énumèrent les informations collectées par la grille d'observation pour les quatre sections.

1. Les **conditions climatiques** : *visibilité, météo, condition de la chaussée, remarques*
2. La **localisation du relevé de vitesse** : *description de la localisation, coordonnées GPS, équipement utilisé, direction(s) à l'étude*
3. L'**identification de la zone étudiée** : *municipalité, route, localisation du site, longueur, milieu, classification, DJMA, vitesse affichée actuelle, vitesse affichée antérieure*
4. Les **caractéristiques de la zone étudiée** : *type de chaussée, qualité de la chaussée, état du marquage, sens unique, nombre de voie, largeur de voie, chaussée séparée, accotements, trottoirs, voies cyclables, fossés, stationnement, dégagement visuel latéral, nombre d'entrées d'accès, nombre de bâtiments, intersection, pente, courbe, ouvrage d'ingénierie, travaux de voirie*

Dans la catégorie des caractéristiques de la zone étudiée, quelques paramètres ont été mesurés au terrain, tel que les largeurs de voies et d'accotements, d'autres ont été mesurés par ordinateur (via

Google Maps), tel que le dégagement visuel latéral et certaines caractéristiques ont subi uniquement une évaluation visuelle, telle que la qualité de la chaussée. Le calcul du dégagement visuel latéral, ainsi que la densité d'accès sont élaborés ci-dessous.

Dégagement visuel latéral :

Il existe plusieurs définitions du dégagement visuel latéral. La définition utilisée pour cette étude est la même que dans l'étude de Bellalite (2011). Le dégagement visuel latéral représente la distance latérale entre deux obstacles de chaque côté de la route qui sont dans le champ de vision du conducteur (ex. arbres, maisons, etc.). En d'autres mots, il s'agit de la marge de recul mesurée à partir de la ligne de rive de chaque côté de la route et de la largeur des voies de circulation. Par exemple, la figure 3.5 illustre une route à deux voies contiguës ayant un écran végétal dense et la figure 3.6 présente une route en milieu résidentiel.



Figure 3.5: Exemple de dégagement visuel latéral en milieu boisé (site 18)



Figure 3.6: Exemple de dégagement visuel latéral en milieu résidentiel (site 10)

(Source : Google Maps)

Pour la figure de gauche, le dégagement latéral est limité par les deux rangées d'arbres de chaque côté de la route. Pour que la végétation soit considérée comme un écran visuel, les végétaux doivent être d'un minimum de 1,5 mètres de hauteur (Bellalite, 2011). Pour la figure de droite, le dégagement est réduit par la devanture de la maison et la clôture. Dans un cas où il n'y a aucun écran visuel (ex. un terrain de jeux, un lac, une terre agricole, etc.), le dégagement visuel du côté concerné est estimé à 350 mètres (Bellalite, 2011). La figure 3.7 illustre un exemple de la mesure du dégagement visuel latéral sur un site.

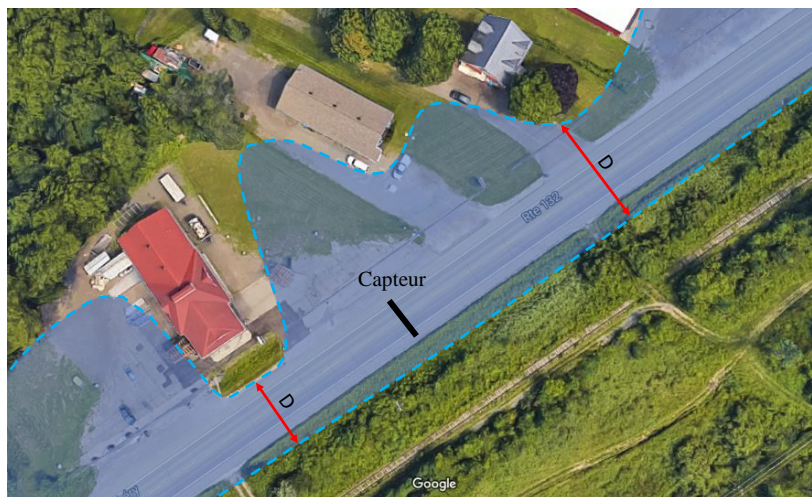


Figure 3.7: Exemple de mesure du dégagement visuel latéral (site 8)

(Source : Google Maps)

Comme il est possible de constater sur l'image, le dégagement visuel latéral varie d'un endroit à l'autre dépendamment de l'emplacement du conducteur. Une mesure ponctuelle du dégagement à l'emplacement du relevé de vitesse est peu représentative du visuel global des automobilistes. Ainsi, 4 à 6 mesures sont prises, par site, autour de l'emplacement du capteur, pour couvrir une distance d'environ 100 à 150 mètres. Puis, une valeur moyenne est retenue pour représenter le site. Ces mesures ont été réalisées à l'aide de Google Street View.

Densité d'accès pondérée :

Pour la densité d'accès, le nombre d'entrées a été compté manuellement sur toute la longueur du site (avec la même limite de vitesse). Les entrées ont été catégorisées en cinq groupes :

- a) Résidentiel (5 logements et moins);
- b) Résidentiel (6 logements et plus);
- c) Commercial, industriel et institutionnel;
- d) Ferme avec bâtiments;
- e) Intersection de rues ou ruelles.

Une fois le comptage terminé, une densité pondérée des accès est calculée pour prendre en considération le nombre moins important de véhicules dans une entrée résidentielle. Les entrées

résidentielles avec 5 logements et moins ont une pondération de 1,0 et sont dans la classe A. Le reste des entrées comptabilisées ont une pondération de 1,5 et sont dans la classe B.

$$\text{Densité pondérée d'accès} = \frac{A + 1,5 B}{\text{Longueur de la zone (km)}} \quad (3.1)$$

Cette méthode est recommandée par le MTQ et elle est décrite dans leur guide de détermination des limites de vitesse (Ministère des Transports du Québec, 2002).

3.1.4 Traitement et filtrage des données de vitesse

Deux types de données de circulation sont disponibles : les données du capteur WayCount et les données des capteurs du MTQ. Les données du capteur WayCount sont les données collectées au terrain à partir des tubes pneumatiques. Ces données sont disponibles uniquement pour le groupe cas-2. Les données des capteurs du MTQ sont les données de comptage et de vitesses fournis par le ministère. Ces données sont disponibles pour les trois groupes. Dépendamment du site, un certain nombre de relevés de vitesse a été effectué au cours des vingt dernières années. Toutes ces données ont été fournies par le MTQ. Ces deux bases de données, les données des capteurs WayCount et celles du ministère, requièrent un premier traitement individuel pour éliminer certaines données. Une fois les bases de données nettoyées, elles sont regroupées et elles sont filtrées, à nouveau, selon quatre critères pour conserver uniquement les données pertinentes à l'étude.

3.1.4.1 Base de données du capteur WayCount

Le capteur WayCount permet de générer une liste des véhicules qui sont passés sur les tubes durant la période de collecte de données au terrain. Le fichier permet de connaître la date et le moment exact du passage, la direction, la vitesse, la classe du véhicule et le nombre d'essieu. Les données collectées brutes des véhicules ont été traitées et filtrées pour conserver uniquement les véhicules en écoulement libre. La vitesse à écoulement libre est la vitesse désirée des conducteurs dans des conditions de faible volume. Un des facteurs qui affecte le choix de la vitesse pratiquée est la présence d'un véhicule plus lent à l'avant. Pour que le véhicule soit considéré en écoulement libre, le temps inter-véhiculaire (TIV) doit être d'au moins 4 secondes (selon les exigences du MTQ). Le TIV est le temps que sépare deux véhicules qui se suivent. Si cette condition n'est pas respectée,

les vitesses des véhicules suiveurs sont retirées de l'analyse. Ensuite, certaines données du fichier ont été supprimées pour une de ces deux raisons :

- le véhicule a une vitesse nulle selon la base de données ; ou
- deux véhicules ou plus passent au même instant sur les tubes pneumatiques (TIV nul).

Les véhicules à l'arrêt ne sont pas pertinents à l'étude, puisque ce sont les véhicules en écoulement libre qui nous intéressent. Pour ce qui est du TIV nul, il a été expliqué précédemment que le capteur WayCount fait défaut lorsqu'il y a plus d'un véhicule qui passe au même instant (voir section 3.1.3.1.5 Qualité de la collecte (Limitations)). C'est pour cette limitation de l'appareil que ces données ont été retirées.

3.1.4.2 Base de données du MTQ

Le format des données du MTQ est différent de celui des données collectées au terrain. Pour chaque site, un fichier de données a été généré par le ministère. Chaque ligne de ce fichier représente un jour, une durée de collecte d'une heure et une direction. Durant l'heure de collecte, les voitures sont catégorisées selon leur vitesse pratiquée (dans des intervalles de valeur de vitesse) et le nombre de voitures par catégorie est comptabilisé. Un exemple de ce fichier est disponible au tableau 3.2.

Tableau 3.2 : Exemple de fichier de données de vitesse du MTQ

0_40	40_50	50_60	60_70	70_80	80_90	90_100	100_110	110_120	120_130	130_140	140+	Indéterminée	dat	heure	STATION	VOIE_TOT
0	0	0	1	6	15	11	3	1	0	0	0	0	2004-04-26	21	8116	11
0	0	0	0	1	5	1	3	0	1	0	0	0	2004-04-26	21	8116	12
0	0	0	1	6	7	9	2	2	0	0	0	0	2004-04-26	22	8116	11
0	0	0	1	1	3	3	5	1	3	0	0	0	2004-04-26	22	8116	12
0	0	0	0	4	4	7	2	1	0	0	0	0	2004-04-26	23	8116	11
0	0	0	0	0	1	4	0	0	0	0	1	0	2004-04-26	23	8116	12
0	1	0	1	0	3	4	3	0	0	0	0	0	2004-04-27	0	8116	11
0	0	0	0	1	0	4	0	0	0	0	0	0	2004-04-27	0	8116	12
0	0	0	0	0	5	0	0	2	0	0	0	0	2004-04-27	1	8116	11
0	0	0	1	1	2	1	1	0	0	0	0	0	2004-04-27	1	8116	12
0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2004-04-27	2	8116	11
0	0	0	0	0	2	1	2	1	0	0	0	0	2004-04-27	2	8116	12

Chaque enregistrement de données (durant une heure) a été assigné à une période de relevé de vitesse qui correspond à des jours consécutifs de collecte sans interruption. Cette période est caractérisée par un mois et une année. Par exemple, si deux relevés de vitesse ont été effectués sans interruption du 2 au 8 juin 2005 et du 9 au 15 septembre 2007, les périodes de relevés de vitesse sont respectivement notées : juin 2005 et septembre 2007. Pour chaque période de relevé, seules les données entre 9h et 16h, du lundi au vendredi ont été retenues, pour éviter les effets temporels

sur le comportement. Cette condition permet d'observer uniquement le comportement des conducteurs durant une journée de semaine et à l'extérieur des heures de pointe du matin et du soir.

3.1.4.3 Critères de nettoyage des relevés de vitesse

Les deux bases de données sont assemblées pour former une seule base de données de vitesse. Une fois les bases de données assemblées, quatre critères ont été appliqués sur les relevés de vitesse pour conserver uniquement les données pertinentes à l'étude (critères 1 et 2) et pour éliminer les données qui sont jugées « étranges » (critères 3 et 4). Les critères sont les suivants :

- CRITÈRE 1** Les relevés qui ont été faits en dehors de l'intervalle de six ans avant à six ans après le changement de limite de vitesse sont retirés (pour les sites cas).
- CRITÈRE 2** Les relevés effectués dans l'intervalle de six mois avant à de six mois après le changement de limite de vitesse sont retirés (pour les sites cas).
- CRITÈRE 3** Les relevés dont la vitesse moyenne (entre 9 h et 16 h, du lundi au vendredi) est supérieure de 30 km/h de plus à la limite de vitesse sont retirés.
- CRITÈRE 4** Les relevés dont la distribution des vitesses pratiquées est décalée des distributions des autres relevés (avec un chevauchement nul ou très faible) sont retirés.

Les deux premiers critères concernent seulement les groupe cas-1 et groupe cas-2, soit les sites ayant eu un changement à la limite de vitesse. Pour le premier critère, les relevés de vitesse les plus éloignés de la date du changement de vitesse ont été retirés des analyses pour éviter que les variations de la vitesse dans le temps n'affectent les résultats de l'effet de la modification de limite de vitesse. Le deuxième critère élimine les relevés de vitesse qui sont six mois avant et six mois après le changement de limite de vitesse, puisque des variations importantes de vitesses pratiquées ont été observées sur certains sites durant cette période. Également, il est possible que des

événements liés au changement de vitesse (travaux) aient un impact sur la vitesse pratiquée. La figure 3.8 illustre les critères 1 et 2 sur une ligne du temps.

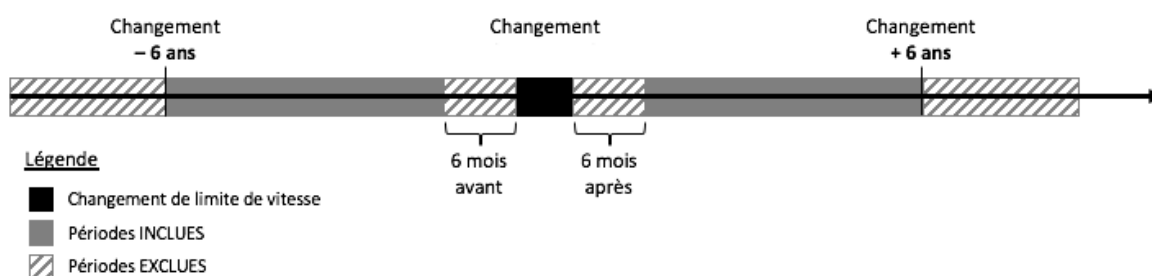


Figure 3.8 : Représentation des critères 1 et 2 sur une ligne du temps

Pour le troisième critère, les relevés avec des vitesses moyennes qui excèdent de 30 km/h et plus la limite de vitesse soulèvent des questions quant à la qualité des données, puisque de telles vitesses semblent très élevées et sont souvent isolées parmi les autres relevés. La figure 3.9 présente un exemple d'application du critère 3 sur les relevés de vitesse du site cas 218.

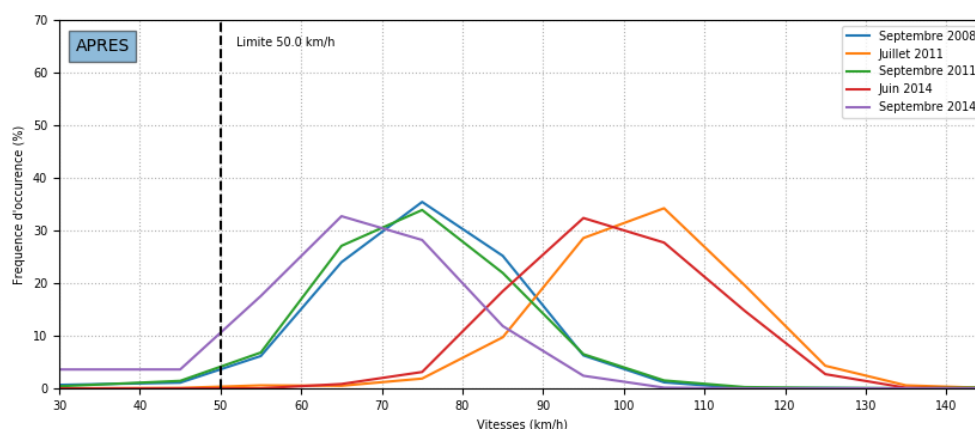


Figure 3.9 : Exemple d'application du critère 3 sur les relevés de vitesse du site cas 218

Les relevés de vitesse de juillet 2011 et de juin 2014 ont été retirés des analyses puisque de telles observations indiquent qu'il y a une grande proportion de conducteurs qui circulent à plus de 30 km/h au-dessus de la limite de vitesse. Ces relevés semblent aberrants ou tout du moins incohérents avec les autres données. Finalement, le quatrième critère cible les distributions de vitesse. Lorsqu'il y a plusieurs distributions de vitesse, les distributions sont comparées et leur décalage, ou chevauchement, est évalué visuellement. Pour les sites cas, les distributions avant le changement et les distributions après le changement sont comparées séparément. Si une distribution pour un

relevé est décalée des distributions des autres relevés, le relevé est retiré de l'analyse. Si plusieurs distributions sont décalées et qu'il ne semble pas y avoir une tendance claire des vitesses relevées au cours du temps (baisse ou augmentation à mesure que le temps passe), le site est retiré des analyses. La figure 3.10 présente un exemple d'application du critère 4 sur les relevés de vitesse du site témoin 302.

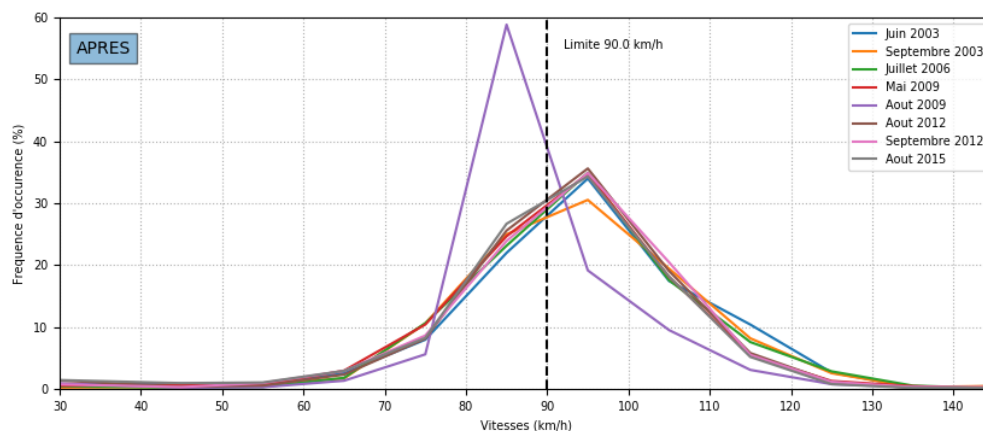


Figure 3.10 : Exemple d'application du critère 4 sur les relevés de vitesse du site témoin 302

Le relevé de vitesse d'août 2009 a été retiré des analyses puisque sa distribution était décalée par rapport aux autres distributions. Ce relevé de vitesses ne représente pas les tendances générales observées sur ce site.

3.1.5 Méthode d'analyse

Dans la méthode d'analyse, quatre thèmes sont abordés : les indicateurs de performance, le test statistique de comparaison des moyennes, les modèles prédictifs du comportement des conducteurs pour le groupe cas-1 et l'analyse descriptive du comportement des conducteurs pour le groupe cas-2.

3.1.5.1 Indicateurs de performance

Pour évaluer le comportement des conducteurs selon les changements de limite de vitesse, quatre indicateurs de performances sont utilisés. Ils permettent de comparer l'ensemble des sites et de dresser un portrait de l'impact des limites de vitesse pour chacun des sites. Ces indicateurs de performance sont, également, utilisés pour évaluer le comportement des conducteurs selon

différentes caractéristiques de la route et de l'environnement routier. Les indicateurs sont les suivants :

1. La vitesse pratiquée moyenne (V_{moy}) ;
2. Le 85^e centile des vitesses pratiquées (V_{85}) ;
3. La proportion d'excès de vitesse (contrevenants) ;
4. La vitesse pratiquée moyenne divisée par la limite de vitesse ($V_{\text{moy}}/V_{\text{affichée}}$), appelée le ratio des vitesses (Morency et al., 2017).

Les vitesses pratiquées moyennes sont les vitesses de véhicules en circulation libre (filtrage des observations avec un temps inter-véhiculaire supérieur à 4 s). La proportion d'excès de vitesse est calculée en pourcentage de véhicules dont la vitesse dépasse la limite. La proportion d'excès peut, également, être représentée par catégorie d'excès selon son amplitude : aucun excès, 0-10 km, 10-20 km, etc. La proportion d'excès et le ratio des vitesses ($V_{\text{moy}}/V_{\text{affichée}}$) sont utilisés pour comparer les vitesses pratiquées moyennes entre des sites qui n'ont pas la même limite de vitesse. Lorsque $V_{\text{moy}}/V_{\text{affichée}}$ vaut 1, la vitesse moyenne est égale à la limite de vitesse. Lorsque $V_{\text{moy}}/V_{\text{affichée}}$ est entre 0 et 1, la vitesse moyenne est plus faible que la vitesse affichée. Finalement, dans le dernier cas, lorsque $V_{\text{moy}}/V_{\text{affichée}}$ vaut plus de 1, la vitesse moyenne est supérieure à la limite.

Étant donné que les vitesses des véhicules sont catégorisées par intervalle de valeurs dans les relevés du ministère, la valeur milieu de chaque intervalle a été utilisée pour calculer la vitesse moyenne et la vitesse au 85^{ème} centile. Le 85^e centile des vitesses est fortement corrélé avec la vitesse moyenne et n'est donc pas étudié dans les modèles statistiques.

3.1.5.2 Test statistique de comparaison des moyennes

Le test t à deux échantillons est une méthode appropriée pour comparer statistiquement la différence entre la vitesse pratiquée moyenne avant le changement (μ_1) et la vitesse pratiquée moyenne après le changement (μ_2). Lorsque les variances des deux groupes sont inégales, une adaptation du test de Student est utilisée. Ce test se nomme le test t de Welch. L'hypothèse nulle de ce test est qu'il n'y a aucune différence entre les vitesses moyennes ($H_0 : \mu_1 = \mu_2$) et l'hypothèse alternative est qu'il y a une différence entre les vitesses moyennes ($H_1 : \mu_1 < \mu_2$ ou $\mu_1 > \mu_2$). L'hypothèse nulle est rejetée si la probabilité est plus faible que le niveau de confiance à 95% ($p < 0,05$). Les équations du test t de Welch sont :

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (3.2)$$

$$ddl = \frac{(s_1^2/n_1 + s_2^2/n_2)}{\left(\frac{(s_1^2/n_1)^2}{n_1 - 1} + \frac{(s_2^2/n_2)^2}{n_2 - 1}\right)} \quad (3.3)$$

Où \bar{X}_1 et \bar{X}_2 sont respectivement les vitesses moyennes avant et après, s_1^2 et s_2^2 sont les variances des échantillons avant et après, n_1 et n_2 sont la taille des échantillons avant et après, t est la statistique du test et ddl est le degré de liberté. Pour les analyses des sites cas, les échantillons des vitesses pratiquées sont constitués par l'ensemble des vitesses individuelles des véhicules des différents relevés mis ensemble avant et après, après filtrage des relevés.

3.1.5.3 Modèles prédictifs du comportement des conducteurs pour le groupe cas-1

Pour quantifier l'association des caractéristiques de la route à notre disposition avec les modifications des comportements des conducteurs selon les indicateurs de performance, des modèles de régression linéaire multivariés sont estimés pour le groupe cas-1. La corrélation de chaque caractéristique de la route avec les indicateurs de performance est cumulative. Ce modèle prend la forme suivante :

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i \quad (3.4)$$

Où les β_j sont les coefficients à estimer, x_{ij} sont les variables associées à l'observation i , y_i est la variable dépendante du modèle (un des indicateurs de performance) et ε_i est le terme d'erreur du modèle. Les coefficients β_j sont estimés par la méthode des moindres carrés qui minimise l'erreur entre les observations et les prédictions du modèle. Ce modèle de régression linéaire a été développé pour déterminer les associations statistiquement significatives entre certains indicateurs de performances et les caractéristiques des sites. Généralement, les variables indépendantes qui ne sont pas statistiquement significatives à un niveau de confiance de 95 % sont éliminées du modèle. Les modèles sont estimés avec le module `statsmodels` dans le langage Python (Seabold & Perktold, 2010). Les corrélations linéaires (coefficient de Pearson) entre les variables sont étudiées avant de développer les modèles pour éviter d'inclure des variables fortement corrélées dans le

modèle, ce qui biaiserait l'estimation des coefficients. Les modèles des différents indicateurs de performance sont testés par essai erreur selon leur ajustement (R^2 ajusté), le respect des conditions d'estimation d'un modèle linéaire (normalité de la variable dépendante, normalité et hétéroscédasticité des résidus), la cohérence et l'explicabilité des associations identifiées par le modèle.

Deux types de modèles sont étudiés pour chaque indicateur de performance, au niveau des sites et au niveau des sites-relevés.

1. **Au niveau des sites :** L'ensemble des vitesses relevées avant et après le changement de vitesse sont agrégées au niveau des sites, indépendamment des relevés de vitesse : il n'y a ainsi qu'une observation par site dans le modèle.
2. **Au niveau des sites-relevés :** Les vitesses pratiquées sont agrégées seulement pour chaque relevé de chaque site au niveau des sites-relevés : il y a ainsi autant d'observations par site que de relevés distincts, qui sont considérés indépendants (hypothèse simplificatrice).

3.1.5.4 Analyse descriptive du comportement des conducteurs pour le groupe cas-2

Aucun modèle statistique n'a été estimé pour le groupe cas-2 puisqu'il n'y avait pas suffisamment d'observations (20 sites). Toutefois, une analyse descriptive de certains indicateurs permet de ressortir les caractéristiques qui sont les plus fortement associées avec les vitesses pratiquées.

3.1.5.5 Interprétation d'un modèle de régression linéaire

Un test statistique retourne la statistique du test et une valeur p. La valeur p est la probabilité de se tromper en rejetant l'hypothèse nulle d'un test statistique, aussi appelé erreur de première espèce. Dans le cas d'un modèle de régression linéaire, il s'agit du test de l'hypothèse nulle que tous les coefficients du modèle valent zéro. La valeur p est comparée à une valeur seuil (habituellement 5 %). Si la valeur p est inférieure au seuil, l'hypothèse nulle est rejetée. Dans le cas d'un modèle de régression linéaire, cela indique que le modèle capture une certaine relation entre les données, puisqu'au moins un coefficient du modèle est non-nul.

3.2 Présentation des sites

Les sites sont divisés en trois groupes : groupe cas-1, groupe cas-2 et groupe témoin. Les sites de chacun des groupes ont été sélectionnés selon les critères de sélection énumérés à la section 3.1.2 Critères de sélection des sites.

3.2.1 Groupe cas-1

Le groupe cas-1 représente les sites ayant eu un changement de limite de vitesse moins récent, soit entre 2006 et 2013. Ces sites peuvent se situer partout au Québec à condition qu'ils respectent les critères de sélection énumérés précédemment. Au total, 60 sites ont été sélectionnés pour le groupe cas-1. La localisation de ces sites est présentée à la figure 3.11.

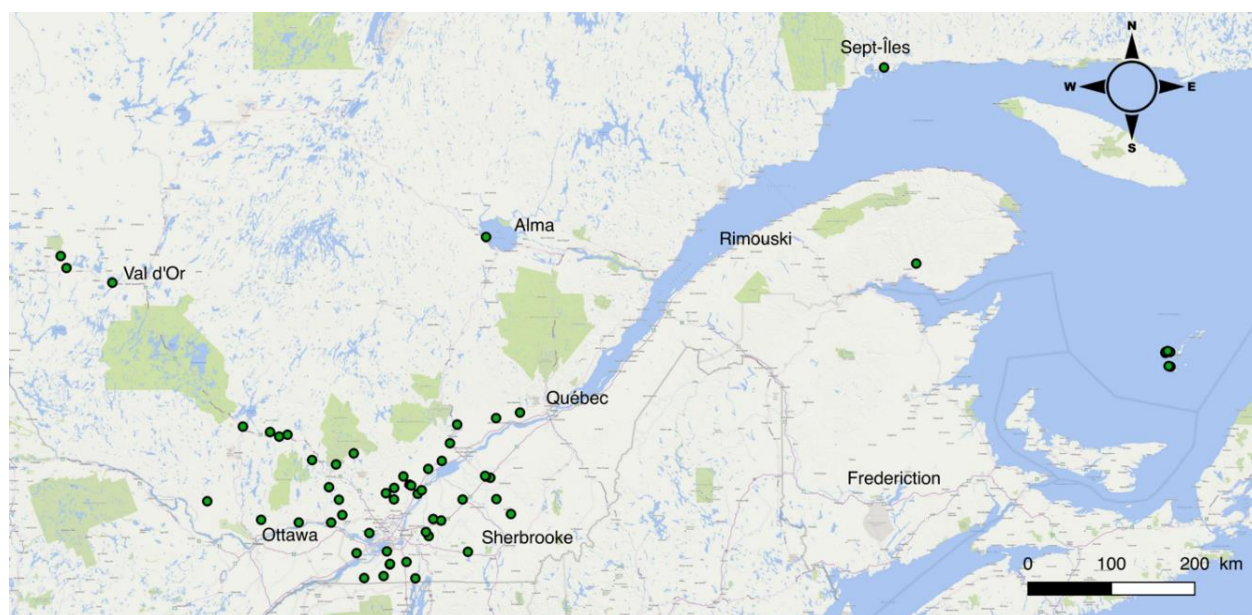


Figure 3.11 : Localisation des sites à l'étude du groupe cas-1 (n = 60)

Les sites (segments de route) ont une longueur entre 0,01 km à 5,34 km. Les routes nationales représentent environ 22 % des sites, les routes régionales, 27 % et les routes collectrices, 52 %. Pour ce qui est du milieu, 10 % sont en milieu urbain, 12 % périurbain et 78 % rural.

3.2.2 Groupe cas-2

Le groupe cas-2 représente les sites ayant eu un changement de limite de vitesse récent, soit entre 2013 et 2017. Les sites retenus se situent dans un périmètre de 2 heures de route de Montréal. Des

données de vitesse et des données supplémentaires des caractéristiques du site ont été collectées directement au terrain. Au total, 20 sites ont été retenus et visités. La localisation de ces sites est présentée à la figure 3.12

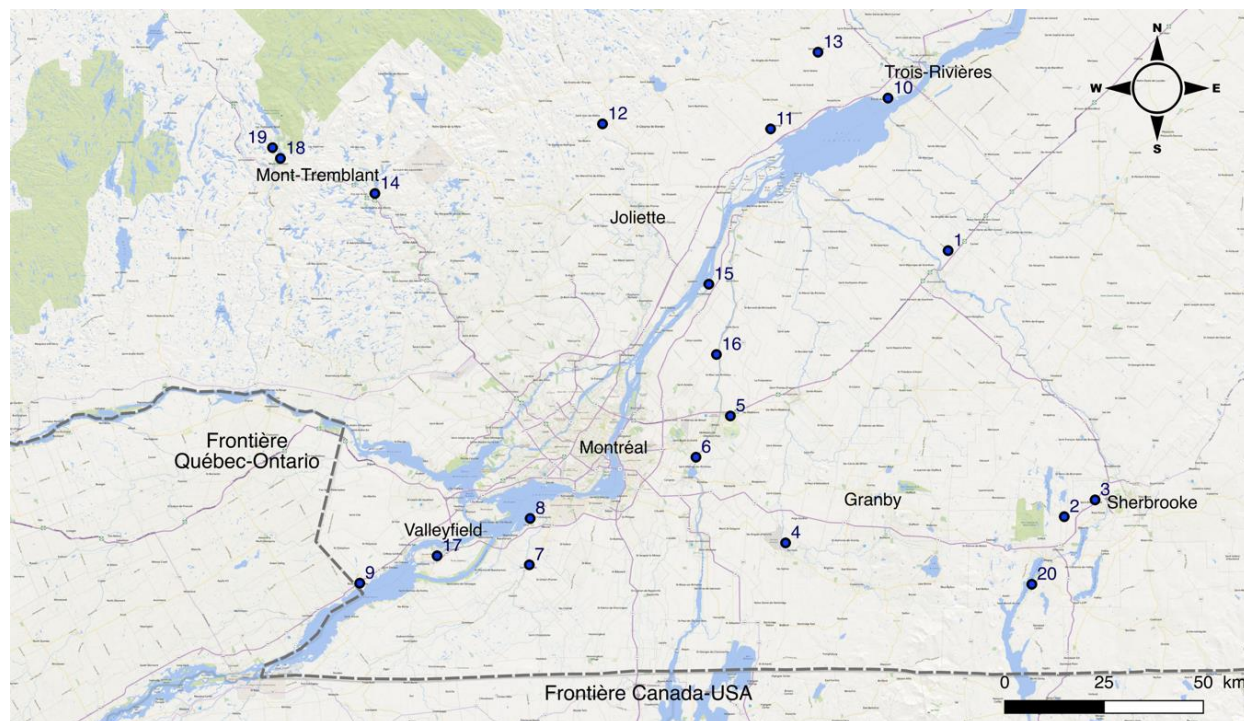


Figure 3.12 : Localisation des sites à l'étude du groupe cas-2 (n = 20)

La zone couverte par l'étude s'étend au nord jusqu'à Trois-Rivières, à l'est jusqu'à Sherbrooke, au sud jusqu'à la frontière avec les États-Unis et à l'ouest jusqu'à la frontière avec l'Ontario. Les sites ont une longueur entre 0,4 km à 8,8 km. Les routes nationales et collectrices représentent chacune 35 % des sites et les routes régionales, 30 %. Pour ce qui est du milieu, 20 % sont en milieu urbain, 30 % périurbain et 50 % rural.

3.2.3 Groupe témoin

Le groupe témoin représente les sites n'ayant eu aucun changement de limite de vitesse depuis l'an 2000. Au total, 43 sites témoins ont été retenus. Leur localisation est présentée à la figure 3.13.

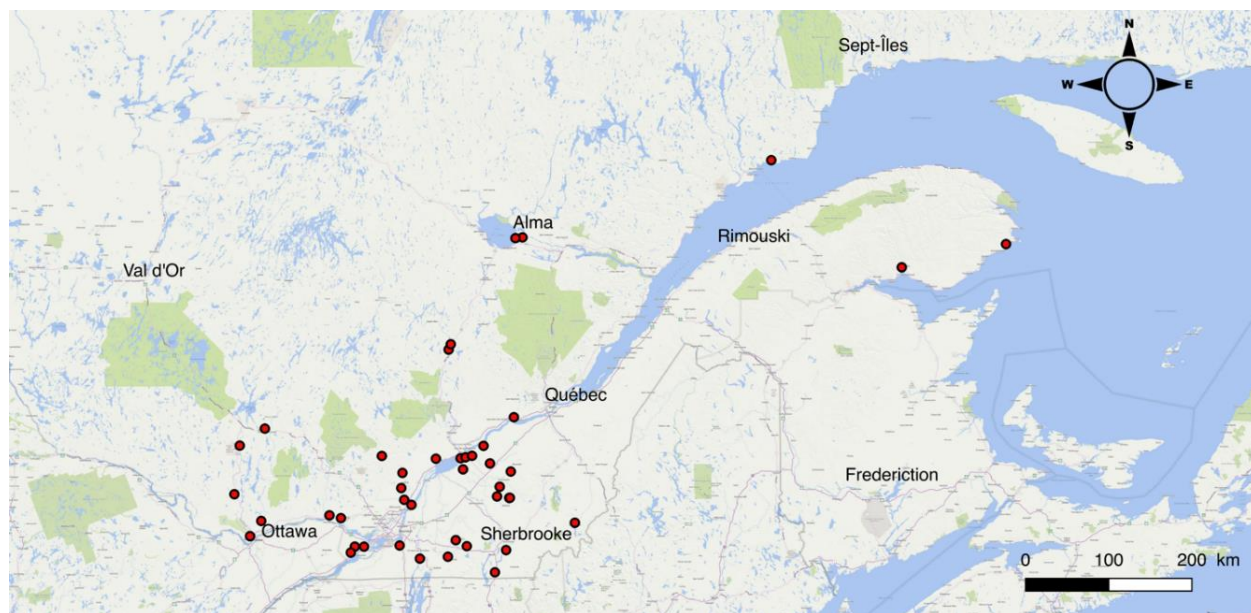


Figure 3.13 : Localisation des sites à l'étude du groupe témoin (n = 43)

Les sites ont une longueur entre 0,01 km à 4,76 km. Les routes nationales représentent 32 % des sites, les routes régionales, 21 % et les routes régionales, 47 %. Pour ce qui est du milieu, 9 % sont en milieu urbain, 28 % périurbain et 63 % rural.

3.2.4 Comparaison des groupes

Les trois groupes regroupés comprennent 123 sites. Une comparaison par groupe des caractéristiques de ces sites est présentée au tableau 3.3.

Les limites de vitesse avant le changement pour les sites cas sont comparables à celles des sites témoins. Le groupe cas-1 a uniquement des sites ayant deux voies contiguës. Pour les groupes cas-2 et témoin, les sites ont entre 2 et 4 voies et pour la grande majorité, les sites possèdent 2 voies. Les longueurs des sites sont variables pour tous les groupes, mais plus de la moitié des sites sont de moins de 2,0 km. Pour plus de détails sur chacun des sites individuellement, veuillez-vous référer à l'annexe B.

Tableau 3.3: Comparaison des caractéristiques des 3 groupes selon le pourcentage par catégorie

Caractéristique	Catégorie	Groupe cas-1	Groupe cas-2	Groupe témoin
Nombre de sites		60	20	43
Limite de vitesse avant	50 km/h	5,0	0,0	0,0
	70 km/h	11,7	25,0	9,3
	80 km/h	40,0	10,0	30,2
	90 km/h	43,4	65,0	60,5
Limite de vitesse après	50 km/h	15,0	20,0	0,0
	70 km/h	55,0	55,0	9,3
	80 km/h	23,3	20,0	30,2
	90 km/h	6,7	5,0	60,5
Classification	Nationale	21,7	35,0	32,6
	Régionale	26,7	30,0	20,9
	Collectrice	51,7	35,0	46,5
Milieu	Urbain	10,0	20,0	9,3
	Périurbain	11,7	30,0	27,9
	Rural	78,3	50,0	62,8
Nombre de voies	2	100,0	85,0	90,7
	3	0,0	5,0	4,7
	4	0,0	10,0	4,7
Direction	2 sens	100,0	90,0	97,7
	Unique	0,0	10,0	2,3
Longueur du site	< 1,0 km	71,7	20,0	39,5
	[1,0 ; 2,0 [	18,3	30,0	34,9
	[2,0 ; 3,0 [	1,7	15,0	16,3
	[3,0 ; 4,0 [	6,7	10,0	7,0
	[4,0 ; 5,0 [	0,0	5,0	2,3
	≥ 5,0 km	1,7	20,0	0,0

3.3 Résultats et analyse des données

L'analyse des données est présentée en cinq parties. La première présente une évaluation du ratio des vitesses pratiquées dans le temps pour identifier la présence ou non d'une tendance temporelle dans le comportement des conducteurs. Ensuite, une évaluation des vitesses moyennes et des vitesses au 85^e centile est faite pour présenter l'effet du changement de limite de vitesse sur les vitesses pratiquées. La troisième partie porte sur la proportion de contrevenants selon les limites de vitesse avant et après la modification. La quatrième partie concerne les modèles de régression linéaire du groupe cas-1 utilisés pour prédire le comportement des conducteurs selon les

caractéristiques de la route. Puis, la dernière partie présente une analyse descriptive des vitesses pratiquées pour le groupe cas-2 afin d'identifier les relations entre le comportement des conducteurs et les caractéristiques de la route et de l'environnement routier.

3.3.1 Évaluation des vitesses pratiquées dans le temps

L'évaluation des vitesses pratiquées en fonction du temps a pour objectif d'identifier une tendance temporelle générale du comportement des conducteurs et des périodes spécifiques durant lesquelles il y aurait des variations importantes des vitesses pratiquées. La figure 3.14 et la figure 3.15 illustrent la relation entre le ratio des vitesses ($V_{\text{moy}}/V_{\text{affichée}}$) et le temps. Chaque point représente un relevé de vitesse effectué sur un site cas (avant ou après un changement de vitesse) pour la première figure et sur un site témoin pour la seconde figure.

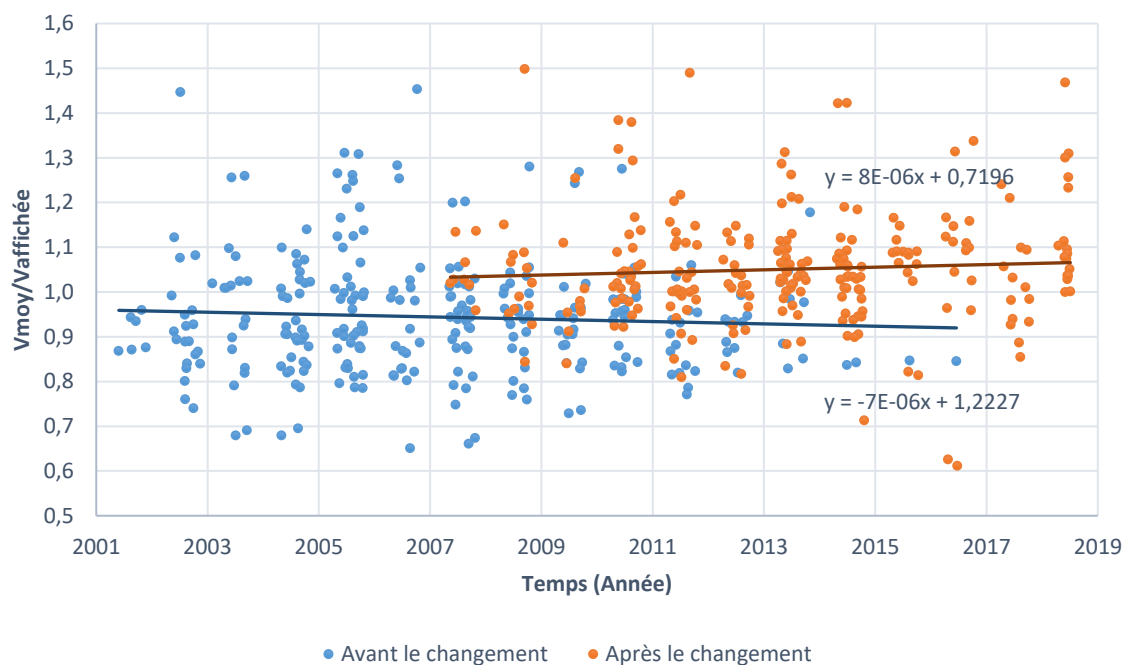


Figure 3.14 : Ratio des vitesses en fonction du temps pour les groupes cas-1 et cas-2

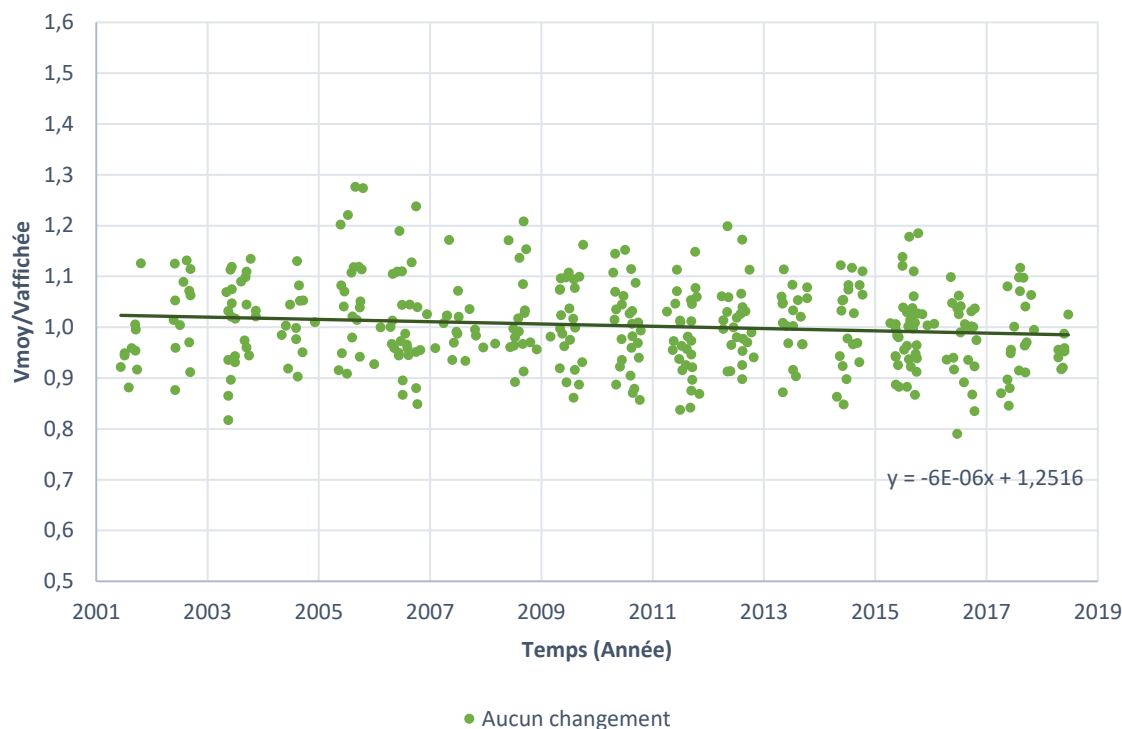


Figure 3.15 : Ratio des vitesses en fonction du temps pour le groupe témoin

Selon les figures, il y a une légère tendance significative de la diminution du ratio des vitesses en fonction du temps pour les sites témoins (modèle de régression linéaire significatif, valeur $p = 0,012$). Pour les sites cas avant le changement de limite de vitesse, on observe une légère baisse non significative du ratio des vitesses en fonction du temps (modèle de régression linéaire non significatif, valeur $p = 0,295$). Ces pentes négatives similaires sont cependant très faibles et le ratio entre les vitesses pratiquée et affichée est globalement stable. Pour les sites cas après le changement de limite de vitesse, le ratio de vitesse tend à augmenter, toutefois, cette relation n'est pas significative (modèle de régression linéaire non significatif, valeur $p = 0,415$). Il y a également beaucoup de variation pour une même année qui est plus importante que pour les sites témoins. Les observations après le changement ont un ratio plus élevé que ceux avant le changement. Les changements apportés aux limites de vitesse sont principalement des diminutions, ce qui indique que les vitesses pratiquées ne baissent pas dans les mêmes proportions que les limites de vitesse.

3.3.2 Évaluation des différentiels dans les vitesses pratiquées

Le tableau 3.4 présente le différentiel des vitesses pratiquées moyennes et des vitesses au 85^e centile pour chaque catégorie de changement de limite de vitesse. Pour plus d'informations sur chaque site, veuillez-vous référer à l'annexe C.

Tableau 3.4 : Évaluation des différentiels des vitesses pratiquées moyennes et des vitesses au 85^e centile des sites cas

Cat. (km/h)	Nb Site	AVANT			APRÈS			Effet V _{moy} (km/h)	Effet V ₈₅ (km/h)
		V _{moy.} (km/h)	V ₈₅ (km/h)	Écart-type (km/h)	V _{moy.} (km/h)	V ₈₅ (km/h)	Écart-type (km/h)		
Augmentation									
50-70	1	72,34	85,00	11,85	72,39	85,00	11,03	↑ 0,05	0,00
50-80	2	64,72	75,00	12,84	65,73	75,00	15,05	↑ 1,01	0,00
70-80	4	83,80	100,00	16,50	84,64	97,50	14,63	↑ 0,84	↓ 2,50
70-90	2	84,32	100,00	14,98	94,01	105,00	15,79	↑ 9,69	↑ 5,00
80-90	3	88,70	101,67	17,07	88,37	101,67	15,04	↓ 0,33	0,00
Diminution									
70-50	4	71,68	80,00	11,58	67,74	77,50	10,98	↓ 3,93	↓ 2,50
80-50	4	64,54	75,00	10,95	54,22	61,25	18,04	↓ 10,33	↓ 13,75
80-70	19	72,98	83,95	15,49	69,89	80,26	13,16	↓ 3,09	↓ 3,68
90-50	3	86,40	101,67	13,64	58,73	68,33	10,53	↓ 27,67	↓ 33,33
90-70	22	82,32	93,64	15,01	77,94	86,55	13,62	↓ 4,38	↓ 4,09
90-80	12	82,14	95,00	14,63	80,49	92,50	13,60	↓ 1,65	↓ 2,50

Il est à noter que tous les résultats sur la vitesse moyenne sont statistiquement significatifs à un niveau de confiance de 95 % à l'exception de la catégorie 50-70 km/h. Également, tous les résultats sur les vitesses au 85^e centile sont statistiquement significatifs à un niveau de confiance de 95 %, à l'exception des catégories 50-70 km/h, 50-80 km/h et 80-90 km/h. Le petit nombre de sites dans certaines catégories appelle à la prudence dans l'interprétation des résultats.

Les augmentations des limites ne sont pas accompagnées d'une augmentation importante des vitesses pratiquées moyennes. Avant la modification, les vitesses pratiquées moyennes sont plus élevées que les vitesses affichées de 8 km/h à 22 km/h. Les nouvelles limites de vitesse semblent plus appropriées au comportement des conducteurs et possiblement aux caractéristiques de la route. La plus grande augmentation des vitesses pratiquées moyennes (9,69 km/h) est pour les deux sites ayant eu une augmentation des limites de vitesse de 70 km/h à 90 km/h.

Pour les diminutions des limites de vitesse, il est possible d'observer des diminutions significatives des vitesses pratiquées moyennes. Pour les diminutions des limites de vitesse de 10 km/h, les

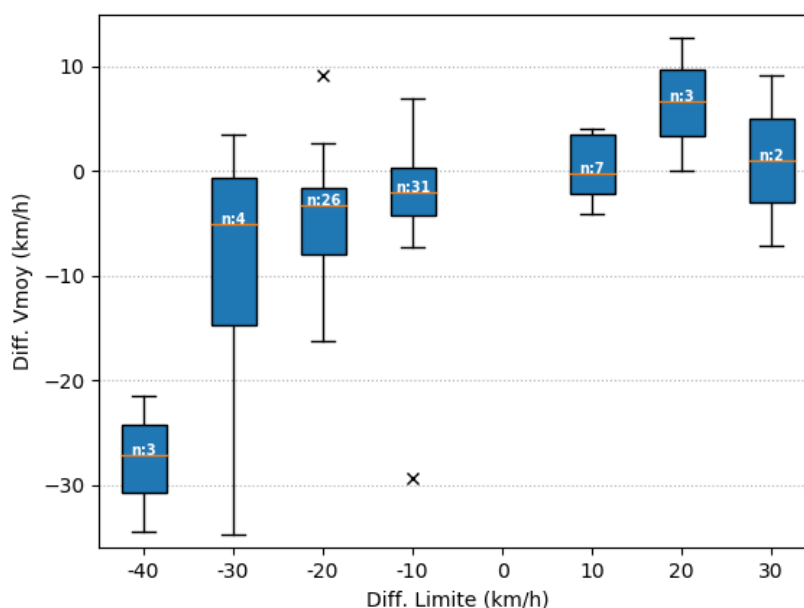
conducteurs ont réduit en moyenne leur vitesse de 3,09 km/h pour la catégorie 80-70 km/h (19 sites) et de 1,65 km/h pour la catégorie 90-80 km/h (12 sites). Avant et après les modifications, les vitesses moyennes des deux catégories respectent les limites prescrites. Pour les diminutions des limites de vitesse de 20 km/h, la catégorie 70-50 km/h (4 sites) présente une diminution moyenne de 3,93 km/h et la catégorie 90-70 km/h (22 sites) indique une diminution moyenne de 4,38 km/h. Les vitesses pratiquées moyennes après la modification sont plus élevées que les vitesses affichées de 17 km/h et 10 km/h respectivement. Ce non-respect des limites de vitesse peut indiquer une mauvaise crédibilité des limites qui semblent inadaptées à leur environnement routier. Pour les diminutions de 30 km/h, la catégorie 80-50 km/h (4 sites) présente une diminution des vitesses moyennes pratiquées de 10,33 km/h. Puis, pour les diminutions de 40 km/h, la catégorie 90-50 km/h (3 sites) révèle une diminution moyenne de 27,67 km/h. Ces changements de limites de vitesse des deux dernières catégories sont accompagnés de diminution importante des vitesses moyennes pratiquées. Ces modifications aux limites de vitesse ont peut-être été accompagnées de changements aux caractéristiques des sites concernés. Aucune information sur les changements à la configuration de la route n'est disponible, ce qui ne permet pas de confirmer cette hypothèse.

Les résultats avec le 85^e centile des vitesses pratiquées présentés dans le tableau 3.4 sont globalement similaires. Les augmentations des limites de vitesse ne sont pas toujours accompagnées d'une augmentation des 85^e centiles des vitesses pratiquées. Aucune variation n'a été observée pour les sites ayant eu des augmentations de 50-70 km/h, 50-80 km/h et 80-90 km/h (non significatifs). Une diminution de 2,5 km/h des vitesses est observée pour les augmentations des limites de vitesse de 70-80 km/h et une augmentation de 5,0 km/h est observé pour la catégorie 70-90 km/h. Il est à noter que le nombre de sites pour les augmentations est faible, soit moins de 5 sites par catégorie. Il est, également, possible d'observer que les vitesses au 85^e centile avant la modification sont plus élevées que les vitesses affichées, soit entre 20 et 35 km/h de plus et que les vitesses au 85^e centile, après la modification, sont plus rapprochées des limites de vitesse. Un constat similaire a été fait pour les vitesses moyennes, ce qui laisse supposer que les limites de vitesse n'étaient pas crédibles pour ces sites avant la modification et que l'augmentation de ces limites a eu un effet positif sur la conformité.

Pour toutes les catégories de diminution des limites de vitesse, une diminution des vitesses pratiquées au 85^e centile est observée. Pour les diminutions des limites de vitesse de 10 km/h, la vitesse pratiquée au 85^e centile a diminué en moyenne de 3,68 km/h pour la catégorie 80-70 km/h

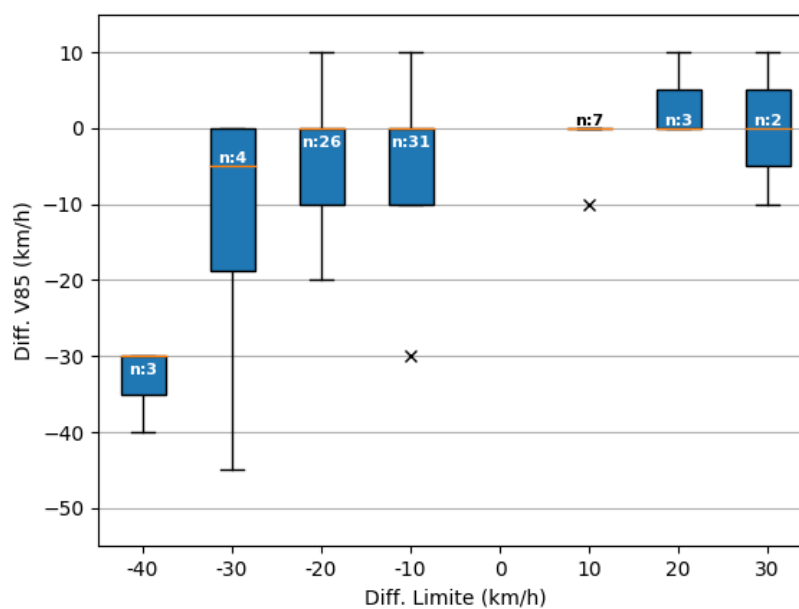
et de 4,09 km/h pour la catégorie 90-80 km/h. Pour les diminutions des limites de vitesse de 20 km/h, la vitesse pratiquée au 85^e centile a diminué en moyenne de 2,50 km/h pour les catégories 70-50 km/h et 90-70 km/h. Les vitesses pratiquées avant la modification sont en moyenne de 10 km/h et 5 km/h plus élevées, respectivement, que la limite de vitesse. Le petit changement de comportement des conducteurs montre le manque de respect des limites de vitesse imposées lors de la baisse des limites de vitesse. Pour les diminutions des limites de vitesse de 30 km/h, soit la catégorie 80-50 km/h, une diminution de 13,75 km/h de la moyenne des vitesses au 85^e centile est observée. Puis, pour la catégorie 90-50 km/h, soit une diminution de 40 km/h de la limite de vitesse, une diminution importante de 33,33 km/h est observée pour la moyenne des 85^e centiles des vitesses pratiquées. Tous les résultats obtenus sont statistiquement significatifs à un niveau de confiance de 95 %, à l'exception des catégories 50-70 km/h, 50-80 km/h et 80-90 km/h.

En complément, la figure 3.16 illustre le différentiel des vitesses pratiquées et la figure 3.17 illustre le différentiel des 85^e centiles des vitesses pratiquées par site selon la modification de la limite de vitesse sous forme de boîtes à moustaches. Le nombre de sites est indiqué dans chacune des boîtes.



75 ^{ème} centile	-23,7	1,0	0,5	1,1	3,6	10,9	6,7
Médiane	-27,1	-5,0	-3,3	-2,0	-0,3	6,7	1,0
25 ^{ème} centile	-30,7	-14,7	-8,0	-4,2	-2,2	3,4	-3,0
Moyenne	-27,7	-10,3	-4,3	-2,5	0,3	6,5	1,0

Figure 3.16 : Différentiel des vitesses pratiquées moyennes par site selon le différentiel des limites de vitesse



75 ^{ème} centile	-30,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	5,0
Médiane	-30,0	-5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25 ^{ème} centile	-35,0	-18,8	-10,0	-10,0	0,0	0,0	-5,0
Moyenne	-33,3	-13,8	-3,8	-3,2	-1,4	3,3	0,0

Figure 3.17 : Différentiel des 85e centiles des vitesses par site selon le différentiel des limites de vitesse

Une boîte à moustache est une représentation visuelle des données. La ligne en orange indique la médiane des différences de vitesse moyenne pratiquée. La partie supérieure de la boîte (rectangle) indique le 75^{ème} centile (3^{ème} quartile) et la partie inférieure de la boîte indique le 25^{ème} centile (1^{er} quartile) des différences de vitesse moyenne pratiquée. Les moustaches (les lignes) vont jusqu'à la valeur la plus éloignée jusqu'à un maximum de 1,5 fois la hauteur de la boîte (intervalle interquartile). Les observations qui en dehors de l'intervalle des moustaches sont représentées par des points isolés.

Comme il a été observé précédemment, le différentiel des vitesses pratiquées moyennes n'est pas proportionnel au différentiel des vitesses affichées. En effet, une diminution des limites de vitesse de 10 km/h entraîne en moyenne une diminution de 2,5 km/h des vitesses moyennes pratiquées (diminution médiane de 2,0 km/h). Le 25^{ème} centile associé à ce changement est de -4,3 km/h, ce qui veut dire que 25 % des sites ont enregistré une diminution d'au moins 4,3 km/h des vitesses moyennes pratiquées. Cette valeur correspond à environ la moitié du différentiel des vitesses affichées. Le même constat est fait pour les diminutions de 20 km/h et de 30 km/h : une diminution

des vitesses moyennes pratiquées de la moitié du changement de vitesse est observée pour seulement 25 % des sites. Pour les diminutions de 40 km/h, la moitié des sites a observé une diminution des vitesses moyennes pratiquées d'au moins 27 km/h. Comme il a été expliqué, ces diminutions importantes dans les vitesses moyennes pratiquées sont probablement associées à un changement à l'environnement routier. Ensuite, pour les augmentations des limites de vitesse, l'augmentation des vitesses pratiquées n'est pas aussi importante que le changement de limites, ce qui est lié aux vitesses moyennes pratiquées déjà élevées avant la modification à la majorité des sites.

Pour les vitesses au 85^e centile, une diminution de 10 km/h de la limite de vitesse entraîne, en moyenne, une diminution de 3,2 km/h du 85^e centile de la vitesse pratiquée. Pour une diminution de 20 km/h de la limite de vitesse, le 85^e centile diminue, en moyenne, de 3,8 km/h. Toutefois, la médiane de ces diminutions est de zéro, ce qui vaut dire que pour plus de la moitié des sites, le changement n'a eu aucun effet sur le comportement des conducteurs. Les sites ayant subi une diminution de la limite de vitesse de 30 km/h et de 40 km/h ont connu une diminution de 13,8 km/h et de 33,3 km/h, respectivement, en moyenne.

Finalement, l'augmentation des vitesses pratiquées et des vitesses au 85^e centile n'est pas aussi importante que le changement de limite de vitesse. Ce constat est lié aux vitesses pratiquées moyennes et aux vitesses au 85^e centile qui étaient déjà élevées avant la modification : le changement de vitesse à la hausse semble refléter les comportements déjà en place de la part des automobilistes.

Ces analyses montrent que, dans l'ensemble, les changements de limite de vitesse semblent avoir un effet sur le comportement des conducteurs. Toutefois, la modification de comportement n'est pas aussi importante que le changement des limites de vitesse.

3.3.3 Proportion d'excès de la limite de vitesse

La figure 3.18 illustre le différentiel du pourcentage de contrevenants, c'est-à-dire la proportion de véhicules excédant la limite de vitesse, selon les limites de vitesse avant et après la modification.

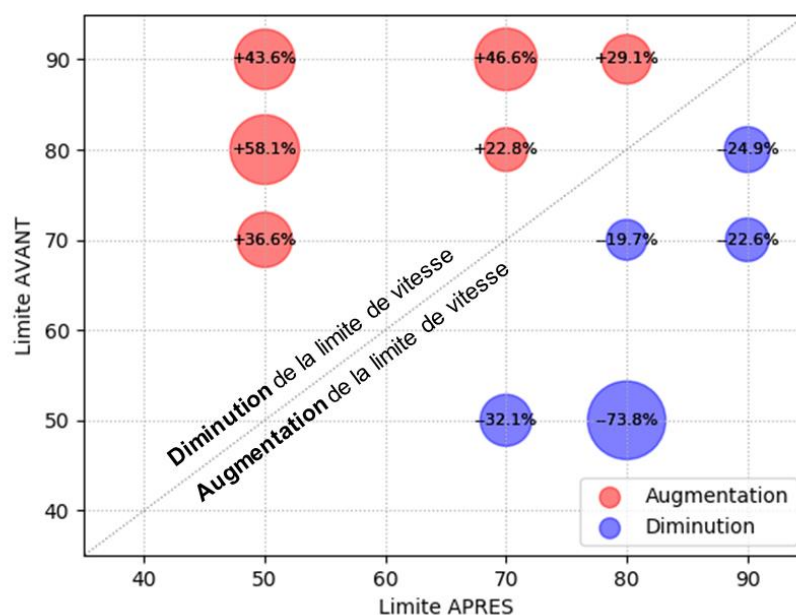


Figure 3.18 : Variation du pourcentage de contrevenants selon les limites de vitesse avant et après le changement

La valeur de chacune des bulles représente la différence entre le pourcentage de contrevenants après et avant la modification. Une valeur positive représente une augmentation de la proportion de conducteurs qui excèdent la limite de vitesse et une valeur négative représente une diminution. Toutes les bulles au-dessus de la diagonale sont des diminutions de la limite de vitesse. Ces changements ont, tous, apporté une augmentation de la proportion de contrevenants. Toutes les bulles au-dessous de la diagonale sont des augmentations de la limite de vitesse. Ces augmentations de limite ont toutes entraîné des diminutions de la proportion de contrevenants. En général, plus la bulle est éloignée de la diagonale, plus le différentiel de proportion de contrevenants est élevé. Ainsi, plus l'augmentation des limites est grande, moins il y a de contrevenants et plus la diminution des limites est grande, plus il y a de contrevenants. Les résultats de la figure sont en accord avec les comportements attendus.

3.3.4 Modèles des vitesses pratiquées pour le groupe cas-1

Le groupe cas-1 regroupe tous les sites ayant eu un changement de limite de vitesse entre 2006 et 2013. Il est constitué de 60 sites qui totalisent un peu plus de 3 millions d'observations individuelles de vitesses. Étant donné qu'aucune donnée n'a été collectée sur le terrain pour ce groupe, les caractéristiques de la route et de l'environnement routier sont limitées aux données disponibles

dans la base de données de travail. Pour plus d'informations sur les caractéristiques disponibles et la répartition de ces caractéristiques, veuillez-vous référer à l'annexe D.

Tous les sites ont deux directions de circulation, avec une voie par direction. Pour deux de ces sites, les voies sont séparées par un terre-plein central et pour les autres, il s'agit de deux voies contiguës. Parmi les sites du groupe cas-1, onze sites ont vu une augmentation de leur limite de vitesse. Étant donné que les conducteurs se comportent différemment à ces sites (selon les analyses précédentes), les modèles présentés sont estimés uniquement à partir des données provenant des sites ayant subi des diminutions de la limite. Pour plus d'informations sur les modèles, veuillez-vous référer à l'annexe E, où l'on retrouve, également, des matrices de corrélations entre les variables.

Les modèles des vitesses pratiquées pour le groupe cas-1 sont divisés en deux types d'analyse : au niveau des sites et au niveau des sites-relevés. Les analyses au niveau des sites visent à évaluer les effets des caractéristiques de la route sur le comportement moyen des conducteurs avant et après le changement pour chacun des sites. Les analyses au niveau des sites-relevés visent à évaluer les effets des caractéristiques de la route et de l'effet temporel sur le comportement moyen des conducteurs au moment du relevé de vitesse. Chaque site possède un minimum de deux relevés de vitesse, soit minimalement un avant le changement et un après le changement. Pour évaluer les relations du temps, au niveau des sites-relevés, avec les indicateurs de performance, trois variables caractéristiques des relevés ont été utilisées :

- le moment (variable binaire qui prend la valeur de 1 pour un relevé de vitesse qui est après le changement de limite de vitesse) ;
- l'année et le mois du relevé de vitesse ; et
- l'année du changement de limite de vitesse.

Trois modèles de régression linéaires ont été retenus suite à l'évaluation de la performance de plusieurs modèles.

3.3.4.1 Modèle 1 : Vitesse pratiquée moyenne après le changement (par sites)

Un premier modèle de régression linéaire a été développé pour mettre en relation la vitesse moyenne après le changement ($V_{moy AP}$) et les caractéristiques du site. Le modèle retenu prend la forme suivante :

$$Vmoy AP \sim C(DiffLimite) * Class + Vmoy AV + TPlein_Lat \quad (3.5)$$

Il est à noter que l'équation suit la syntaxe du langage de programmation R³. Ce modèle a pour variables indépendantes le différentiel des limites de vitesse (DiffLimite), qui est toujours négatif puisque seules les diminutions de la limite de vitesse ont été considérées. Également, le modèle a pour variables indépendantes la classification de la route (Class), la vitesse pratiquée moyenne avant le changement (Vmoy AV) et la présence d'un terre-plein latéral (TPlein_Lat). Le « C » entourant la variable DiffLimite veut dire que le différentiel des limites de vitesse est utilisé dans le modèle comme une variable catégorielle (catégories : -40 km/h, -30 km/h, -20 km/h et -10 km/h). Cette variable a été catégorisée puisque les vitesses moyennes n'évoluent pas linéairement avec le différentiel des limites, comme il a été observé à la figure 3.16. Ensuite, la multiplication entre le différentiel des limites de vitesse et la classification de la route indique que le modèle considère les interactions entre ces deux variables, ce qui permet de considérer toutes les combinaisons possibles. Après une analyse des résidus, certains sites (3 sites) ont été retirés du modèle puisque le modèle ne parvenait pas à prédire la vitesse moyenne après le changement à ces sites. Il s'agit des sites ayant un différentiel dans les vitesses pratiquées moyennes inférieures à -25 km/h. Ces sites ne semblent pas se comporter comme les autres sites selon l'analyse des résidus. Le tableau 3.5 présente le modèle de régression linéaire retenu de la vitesse pratiquée moyenne après le changement pour les sites qui ont subi une diminution de la limite de vitesse.

Dans ce modèle, les variables ne sont pas toutes statistiquement significatives à 95 %. La classification nationale n'est pas significative dans le modèle ni certaines relations entre le différentiel des limites de vitesse et la classification. La vitesse pratiquée moyenne après le changement diminue lorsqu'il y a un terre-plein latéral et lorsqu'il s'agit d'une route régionale. Également, le différentiel des limites de vitesse est significativement associé à la vitesse pratiquée après le changement, mais de façon non linéaire. La baisse de la vitesse pratiquée après est plus forte pour un différentiel de -40 km/h, suivi du différentiel de -20 km/h, suivi du différentiel de -10 km/h et du différentiel de -30 km/h.

³ Équation de style R : http://www.statsmodels.org/stable/example_formulas.html

Tableau 3.5 : Modèle de régression linéaire de la vitesse moyenne pratiquée après le changement au niveau des sites

Variable	Coefficient	Erreur type	Test t	Valeur-p
Constante	11,8821	5,796	2,050	0,048
<i>(référence : DiffLimite (-40 km/h))</i>				
DiffLimite (-30 km/h)	13,4123	3,061	4,382	0,000
DiffLimite (-20 km/h)	9,5525	2,465	3,876	0,000
DiffLimite (-10 km/h)	10,2368	2,277	4,495	0,000
<i>(référence : Class (Collectrice))</i>				
Class (Nationale)	0,1023	1,031	0,099	0,922
Class (Régionale)	-7,5042	2,356	-3,186	0,003
<i>(référence : DiffLimite (-40 km/h) : Class (Collectrice))</i>				
DiffLimite (-30 km/h) : Class (Nationale)	8,034e-15	2,08e-15	3,856	0,000
DiffLimite (-20 km/h) : Class (Nationale)	-0,4624	1,661	-0,278	0,782
DiffLimite (-10 km/h) : Class (Nationale)	0,5647	1,464	0,386	0,702
DiffLimite (-30 km/h) : Class (Régionale)	-4,3032	4,638	-0,928	0,360
DiffLimite (-20 km/h) : Class (Régionale)	7,3909	2,891	2,556	0,015
DiffLimite (-10 km/h) : Class (Régionale)	10,7276	2,813	3,813	0,001
Vmoy AV	0,6768	0,080	8,482	0,000
TPlein_Lat	-8,4206	3,466	-2,430	0,020
R ² ajusté = 0,782 (n=46).				

La figure 3.19 illustre la prédiction des vitesses pratiquées moyennes par le modèle et son ajustement.

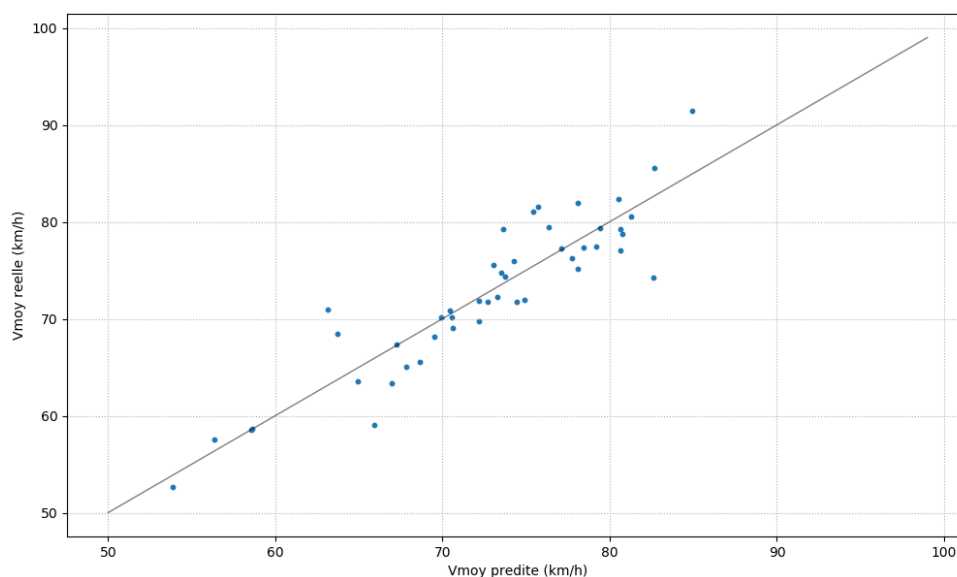


Figure 3.19 : Vitesse moyenne prédite selon la vitesse moyenne réelle du modèle des vitesses pratiquées après le changement au niveau des sites

Pour ce qui est des résidus du modèle, ils suivent une distribution normale à 95 % de niveau de confiance, malgré qu'il y ait certains points atypiques sur le graphique quantile-quantile (voir annexe E). Pour ce qui est de la prédiction du modèle, celle-ci n'est pas parfaite, ce qui laisse suggérer que d'autres caractéristiques non observées pourraient avoir un effet sur les vitesses pratiquées moyennes après le changement.

Pour faciliter la compréhension du modèle, l'équation a été réduite à une seule variable indépendante, soit la vitesse moyenne avant le changement et à une constante b , qui dépend de la classification de la route, du différentiel des limites de vitesse et de la présence d'un terre-plein latéral. L'équation réduite prend la forme suivante :

$$Vmoy AP \sim 0,6768 * Vmoy AV + b \quad (3.6)$$

Où b prend une des valeurs suivantes du tableau 3.6, selon la classification, le différentiel des limites de vitesse et la présence d'un terre-plein latéral.

Tableau 3.6 : Valeur de b de l'équation réduite du modèle des vitesses pratiquées après le changement au niveau des sites

		Différentiel des limites de vitesse			
		-40 km/h	-30 km/h	-20 km/h	-10 km/h
Classification	Nationale	11,98	25,40	21,07	22,79
	Régionale	4,38	13,49	21,32	25,34
	Collectrice	11,88	25,29	21,43	22,12
Présence d'un terre-plein latéral		-8,42			

Dans ce modèle, la présence d'un terre-plein latéral réduit d'un peu plus de 8 km/h la vitesse moyenne après le changement comparativement à une route qui n'en possède pas. La vitesse pratiquée moyenne après le changement augmente le plus lorsque le différentiel des limites de vitesse est de -30 km/h et que la route est nationale ou collectrice. L'augmentation est, également, plus importante pour une diminution de 10 km/h sur une route régionale. La vitesse après le changement possède la plus faible augmentation lorsque la route subit une diminution des limites de vitesse de 40 km/h. Les augmentations sont plus faibles pour les routes régionales comparativement aux autres classes pour un changement de -30 km/h et de -40 km/h, ce qui est peut-être dû au fait que peu de données est disponible pour ces catégories (n=4).

3.3.4.2 Modèle 2 : Différentiel du ratio des vitesses (par sites)

Le deuxième modèle de régression linéaire au niveau des sites met en relation le différentiel du ratio des vitesses (DiffRatio), le différentiel des limites de vitesse (DiffLimite) et la limite de vitesse avant le changement (Limite AV). Le modèle prend la forme suivante :

$$DiffRatio \sim C(DiffLimite) + C(Limite AV) \quad (3.7)$$

Ce modèle a pour variables indépendantes le différentiel des limites de vitesse et la limite de vitesse avant le changement, qui sont, tous les deux, utilisés comme variables catégorielles. Les limites de vitesse avant le changement peuvent prendre trois valeurs : 70 km/h, 80 km/h et 90 km/h. Les sites ayant subi une diminution des limites de vitesse de 30 km/h (n = 4) ont été retirés du modèle après

une analyse des résidus montrant que le modèle faisait une grande erreur dans la prédiction du différentiel des ratios de vitesses. Le tableau 3.7 présente ce modèle.

Tableau 3.7 : Modèle de régression linéaire du différentiel des ratios de vitesses au niveau des sites

Variable	Coefficient	Erreur type	Test t	Valeur-p
Constante	0,3510	0,052	0,734	0,000
<i>(référence : DiffLimite (-40 km/h))</i>				
DiffLimite (-20 km/h) *	-0,0225	0,035	-0,647	0,522
DiffLimite (-10 km/h) *	-0,1283	0,037	-3,449	0,001
<i>(référence : Limite AV (70 km/h))</i>				
Limite AV (80 km/h) **	-0,1146	0,048	-2,408	0,021
Limite AV (90 km/h) **	-0,1364	0,041	-3,299	0,002
R ² ajusté = 0,535 (n=45).				

La variable indicatrice d'une baisse des limites de vitesse de 20 km/h n'est pas significative. Selon le modèle, le ratio des sites ayant une limite de vitesse de 90 km/h diminue de 0,02 de plus que pour les sites ayant une limite de vitesse avant de 80 km/h. Également, les sites qui ont subi une diminution des limites de vitesse de 10 km/h ont une plus grande diminution du ratio que ceux qui ont subi une diminution des limites de vitesse de 20 km/h. Le modèle peut être représenté par la variation attendue du ratio des vitesses dans les différents cas selon la limite avant le changement et le différentiel des limites de vitesse, voir le tableau 3.8.

Tableau 3.8 : Variation attendue du ratio des vitesses selon le modèle

		Différentiel des limites de vitesse			
		-40 km/h	-30 km/h	-20 km/h	-10 km/h
Limite AV	70 km/h	0,351	X	0,329	0,223
	80 km/h	0,236		0,214	0,108
	90 km/h	0,215		0,192	0,086

Dans ce tableau, il est possible de constater que le différentiel du ratio est toujours positif, c'est-à-dire que le ratio augmente dans tous les cas présentés. L'augmentation du ratio est plus élevée pour les sites ayant une limite de vitesse avant de changement de 70 km/h et ce pour tous les différentiels des limites de vitesse. L'augmentation la plus élevée est pour un différentiel des limites de vitesse de -40 km/h. Cependant, il s'agit d'une extrapolation du modèle puisqu'il n'y a aucun site, aucune observation, pour ce cas précis (Limite AV = 70 km/h et DiffLimite = -40 km/h). Les sites où la limite de vitesse passe de 90 km/h à 80 km/h sont les sites ayant subi la plus faible augmentation du ratio des vitesses.

3.3.4.3 Modèles 3 et 4 : Proportion d'excès des limites de vitesse et ratio des vitesses (par sites-relevés)

Le troisième modèle de régression linéaire met en relation la proportion d'excès des limites de vitesse (contrevenants) et les caractéristiques de la route, au niveau des sites-relevés. Le quatrième modèle possède les mêmes variables indépendantes que le troisième modèle, toutefois, la variable dépendante est le ratio des vitesses. Les deux modèles de ces deux variables dépendantes sont similaires puisqu'il existe une forte corrélation entre le ratio des vitesses et la proportion d'excès de vitesse ($R^2 = 0,94$). Ces modèles prennent les formes suivantes :

$$Contr \sim Moment + Limite + Class + TPlein_Lat + Long + ZoneDepassement \quad (3.8)$$

$$Ratio \sim Moment + Limite + Class + TPlein_Lat + Long + ZoneDepassement \quad (3.9)$$

Les variables indépendantes des modèles sont le moment (Moment), la limite de vitesse (Limite), la classification de la route (Class), la présence d'un terre-plein latéral (TPlein_Lat), la longueur du site (Long) et la présence de marquage pour une zone de dépassement (ZoneDepassement). Les deux modèles sont présentés au tableau 3.9. Le modèle de la proportion d'excès de la limite de vitesse possède le meilleur R^2 ajusté.

Tableau 3.9 : Modèles de régression linéaire du pourcentage de contrevenants et du ratio des vitesses au niveau des sites-relevés

Variable	Pourcentage de contrevenants (Contr)			Ratio des vitesses (Ratio)		
	Coefficient	Test t	Valeur-p	Coefficient	Test t	Valeur-p
Constante	103,9843	8,902	0,000	1,3475	25,189	0,000
Class (Nationale)	16,3994	7,176	0,000	0,0652	6,233	0,000
Class (Régionale)	7,1678	3,228	0,001	0,0243	2,394	0,017
TPlein_Lat	-35,8240	-7,570	0,000	-0,2017	-9,305	0,000
Long (en m)	-0,0065	-5,479	0,000	-2,692e-05	-4,970	0,000
Moment	20,2625	7,283	0,000	0,0627	4,924	0,000
Limite	-0,9290	-6,660	0,000	-0,0053	-8,341	0,000
Zone dépassement	14,2436	6,409	0,000	0,0563	5,533	0,000
R ² ajusté = 0,602 (n = 388).			R ² ajusté = 0,581 (n = 388).			

Selon le premier modèle, la proportion d'excès des limites de vitesse est plus élevée après le changement de limite de vitesse (Moment = 1), ce qui est en cohérence avec l'analyse au niveau des sites. De plus, les conducteurs ont tendance à mieux respecter les limites de vitesse en présence d'un terre-plein latéral, puisque le pourcentage tend à diminuer de 36 points de %. Le modèle indique que plus la limite de vitesse est élevée, plus le pourcentage de contrevenants diminue, ce qui est un effet direct de la définition des excès des vitesses. Une observation similaire est faite pour la longueur du site, ce qui pourrait être lié à la position du capteur du relevé de vitesse. Une position du capteur au début du segment et près du panneau de la limite de vitesse laisse moins de temps au conducteur pour ajuster sa vitesse et se conformer à la nouvelle limite de vitesse. À l'inverse, la présence d'une zone de dépassement augmente le pourcentage de contrevenants. Pour le modèle du ratio des vitesses, les mêmes tendances sont observées.

Aucune corrélation avec l'année du changement, ou la durée du temps écoulé entre le relevé et le changement de limite de vitesse n'est décelée dans les modèles testés, ce qui voudrait dire que le moment du changement n'est pas lié au comportement du conducteur à court et à long terme. Toutefois, il y a des faibles associations du moment du relevé de vitesse de certains mois et années. L'année du relevé de vitesse a une forte corrélation avec la variable moment, ainsi l'effet temporel semble se résumer au moment, avant et après le changement de limite de vitesse.

3.3.5 Analyses descriptives du groupe cas-2

Le groupe cas-2 représente 20 sites où il y a eu un changement de limite de vitesse entre 2013 et 2017. Chacun de ces 20 sites a été visité au terrain pour bonifier les informations sur les caractéristiques de la route et de l'environnement routier. Tout comme les modèles du groupe cas-1, certains sites ont été retirés dans analyses suivantes puisque les vitesses observées dans les différents relevés de vitesse de ces sites étaient difficiles à expliquer. Les distributions des vitesses pratiquées avant et après le changement de ces sites problématiques sont disponibles à l'annexe F.

3.3.5.1 Sites retirés du groupe cas-2

Quatre sites ont été retirés des analyses, soit les sites 3, 7, 10 et 13. Pour le site 3, une variation importante entre les relevés de vitesse avant le changement est observée. Certains relevés de vitesse avant le changement ont des vitesses moyennes autour de 60 km/h, tandis que d'autres ont des vitesses moyennes autour de 90 km/h. Il est à noter que la limite de vitesse avant le changement était de 70 km/h. L'explication des fluctuations dans le temps est mal comprise et documentée, ce qui explique le choix de retirer ce site des analyses.

Pour le site 7, un phénomène semblable est observé avant le changement de limite de vitesse. Certains relevés ont une vitesse moyenne autour de 75 km/h, tandis que d'autres ont une vitesse moyenne autour de 100 km/h. La limite de vitesse avant le changement était de 90 km/h. Deux groupes distincts sont observés au fil du temps, ce qui laisse supposer qu'un phénomène non rapporté aurait influencé certains relevés de vitesse.

Pour le site 10, une différence dans les vitesses pratiquées entre les relevés du ministère et celui effectué à partir des tubes est observée. La limite de vitesse après le changement est de 50 km/h. Les relevés du ministère ont une vitesse pratiquée moyenne autour de 85 km/h, tandis que le relevé de l'été 2018, effectué par notre équipe, indique une vitesse moyenne d'environ 55 km/h. Lors de la visite de terrain, il n'y avait pas de perturbation à la circulation. Cette différence est difficilement explicable sans documentation des relevés de vitesse effectués par le ministère et sans indication des changements à l'environnement routier.

Pour le site 13, on constate une hausse des vitesses pratiquées en 2012, avant le changement de la limite de vitesse en 2014. Cette hausse laisse croire qu'il y a eu un changement à l'environnement

routier en 2012, toutefois aucune information est disponible pour affirmer cette hypothèse. Pour éviter que les résultats soient affectés par cette variable, le site a été retiré.

3.3.5.2 Caractéristiques de la route et de l'environnement routier

Bien que plus de caractéristiques de la route et de l'environnement routier sont disponibles pour le groupe cas-2 grâce à la collecte sur le terrain, l'échantillon des sites est petit et limite l'analyse des variables à une analyse descriptive. Le tableau 3.10 présente les caractéristiques des sites étudiés et le pourcentage de sites par catégorie de variables. Cependant, l'analyse descriptive n'est pas faite sur des variables catégorielles, mais sur des variables numériques.

La grande majorité des sites ne possèdent pas de terre-plein central et ont deux voies de circulation. La moitié des sites se situent en milieu rural et la moitié des sites ont un grand dégagement visuel latéral, soit de plus de 100 mètres.

Tableau 3.10 : Répartition des caractéristiques des 16 sites restants du groupe cas-2

Variable	Catégorie	Répartition (%)
Terre-plein central	Oui	12,5
	Non	87,5
Nombre de voies	2	93,8
	3	6,3
Largeur de la chaussée (m)	8,0 à 10,0	37,5
	10,0 à 12,0	31,3
	12,0 et plus	31,3
Largeur moyenne de voie (m)	3,2 à 3,4	37,5
	3,4 à 3,6	37,5
	3,6 et plus	25,0
Dégagement visuel latéral (m)	0 à 50	31,3
	50 à 100	18,8
	100 et plus	50,0
Densité d'accès pondérée (entrées/km)	0 à 10	18,8
	10 à 20	25,0
	20 à 30	31,3
	30 et plus	25,0
Longueur du site (m)	0 à 2000	43,8
	2000 à 4000	31,3
	4000 et plus	25,0
Milieu	Urbain	12,5
	Périurbain	37,5
	Rural	50,0
Classification	Nationale	37,5
	Régionale	31,3
	Collectrice	31,3

3.3.5.3 Analyse descriptive selon le ratio des vitesses

La figure 3.20 illustre la matrice de corrélation linéaire (coefficient de Pearson) des variables présentées précédemment.

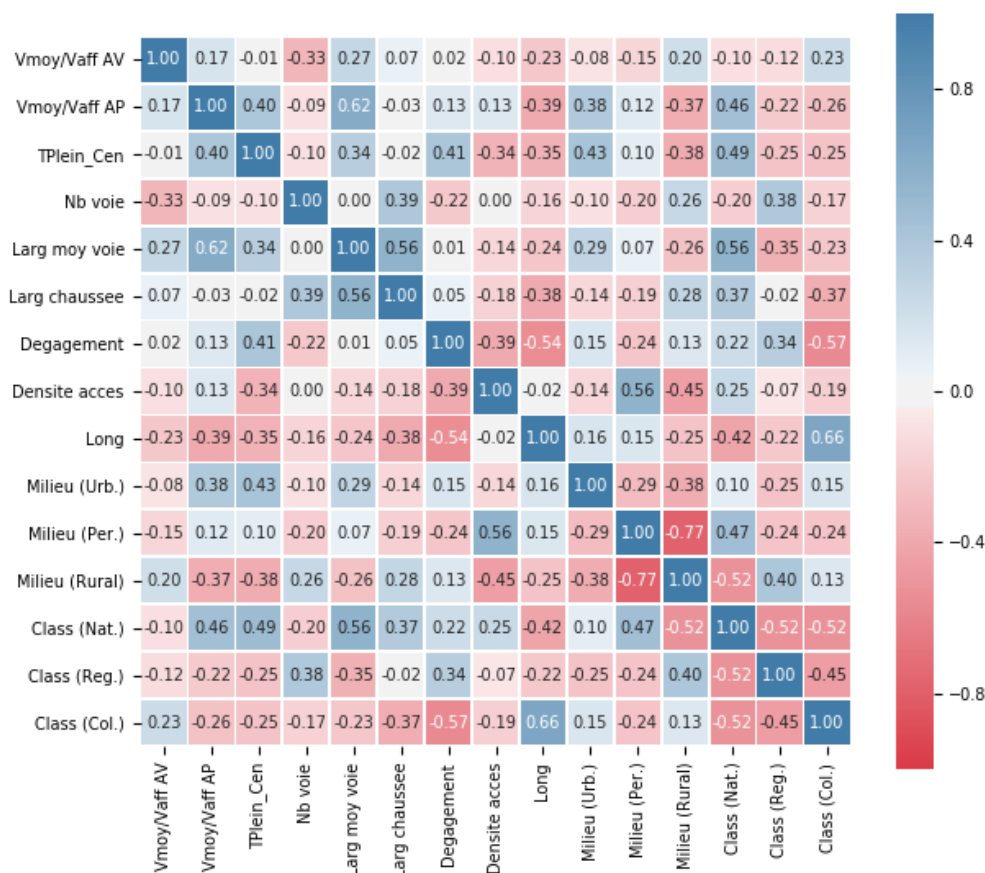


Figure 3.20 : Matrice de corrélation linéaire des caractéristiques du groupe cas-2

La matrice de corrélation permet d'illustrer la dépendance linéaire entre plusieurs variables sur une même figure. Le ratio des vitesses ($V_{\text{moy}}/V_{\text{affichée}}$) est choisi pour étudier l'ensemble des sites indépendamment de leur limite de vitesse, avant et après le changement. Pour le ratio avant le changement, aucune variable ne possède une valeur de corrélation supérieure à 0,4 ou inférieure à -0,4, ce qui signifie qu'aucune variable n'est fortement corrélée à cet indicateur. Le nombre de voies et la largeur de voie moyenne sont les variables qui ont un niveau plus élevé de corrélation. Pour le ratio après le changement, la présence d'un terre-plein central, la largeur de voie moyenne et les routes nationales ont une forte corrélation positive. Le tableau 3.11 présente les relations entre ces caractéristiques de la route et le ratio des vitesses. Il est à noter que le nombre de voies et la présence d'un terre-plein central n'ont pas été analysés individuellement puisqu'il y a seulement

un site qui a 3 voies de circulation et deux sites qui ont un terre-plein central. Par ailleurs, seul un des 16 sites étudiés a subi une augmentation de la limite de vitesse. Celui-ci est indiqué par un marqueur rempli dans les figures du tableau 3.11.

Tableau 3.11 : Ratio des vitesses en fonction des caractéristiques de la route avant et après le changement de limite de vitesse (suite)

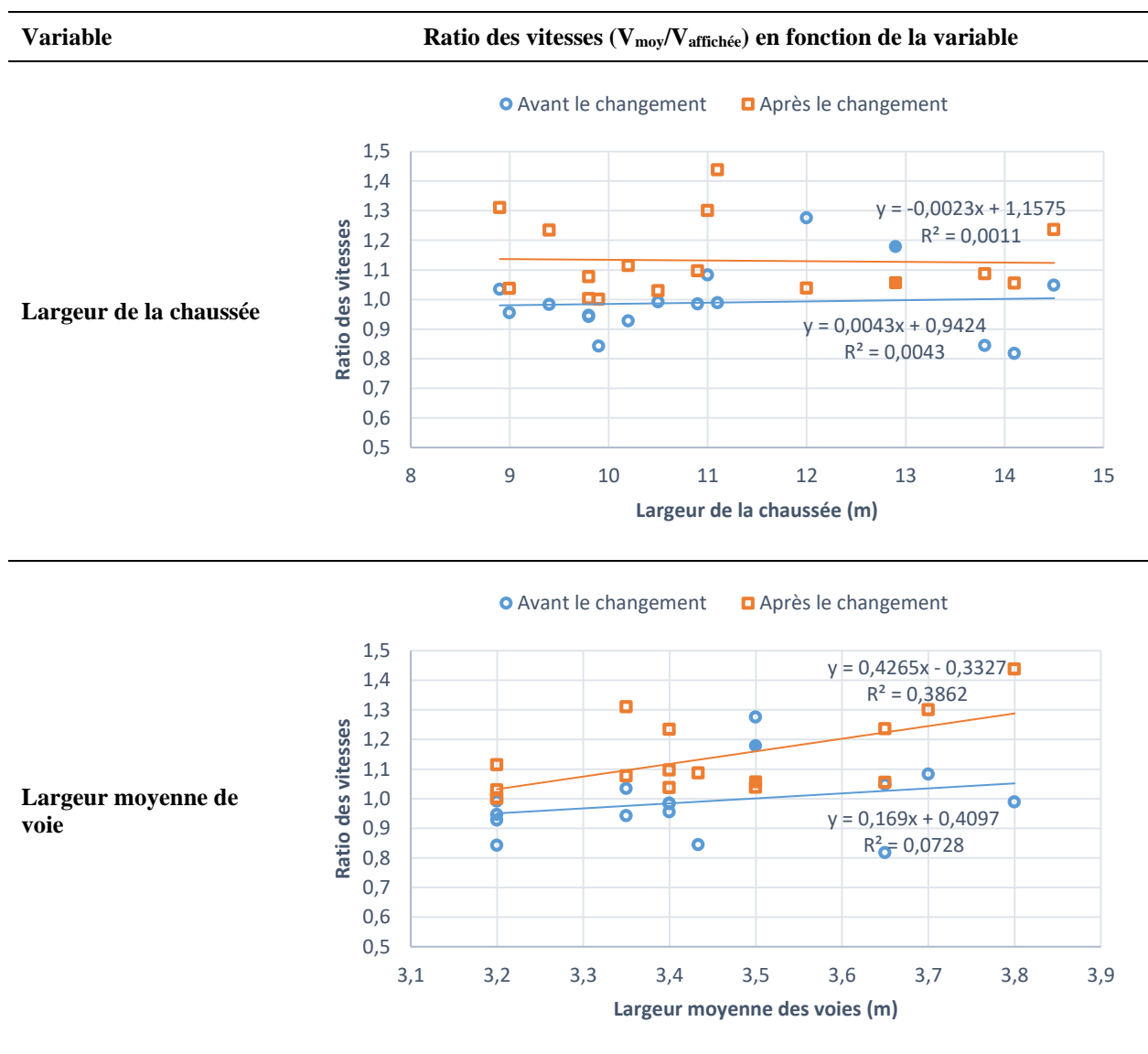


Tableau 3.11 : Ratio des vitesses en fonction des caractéristiques de la route avant et après le changement de limite de vitesse (suite)

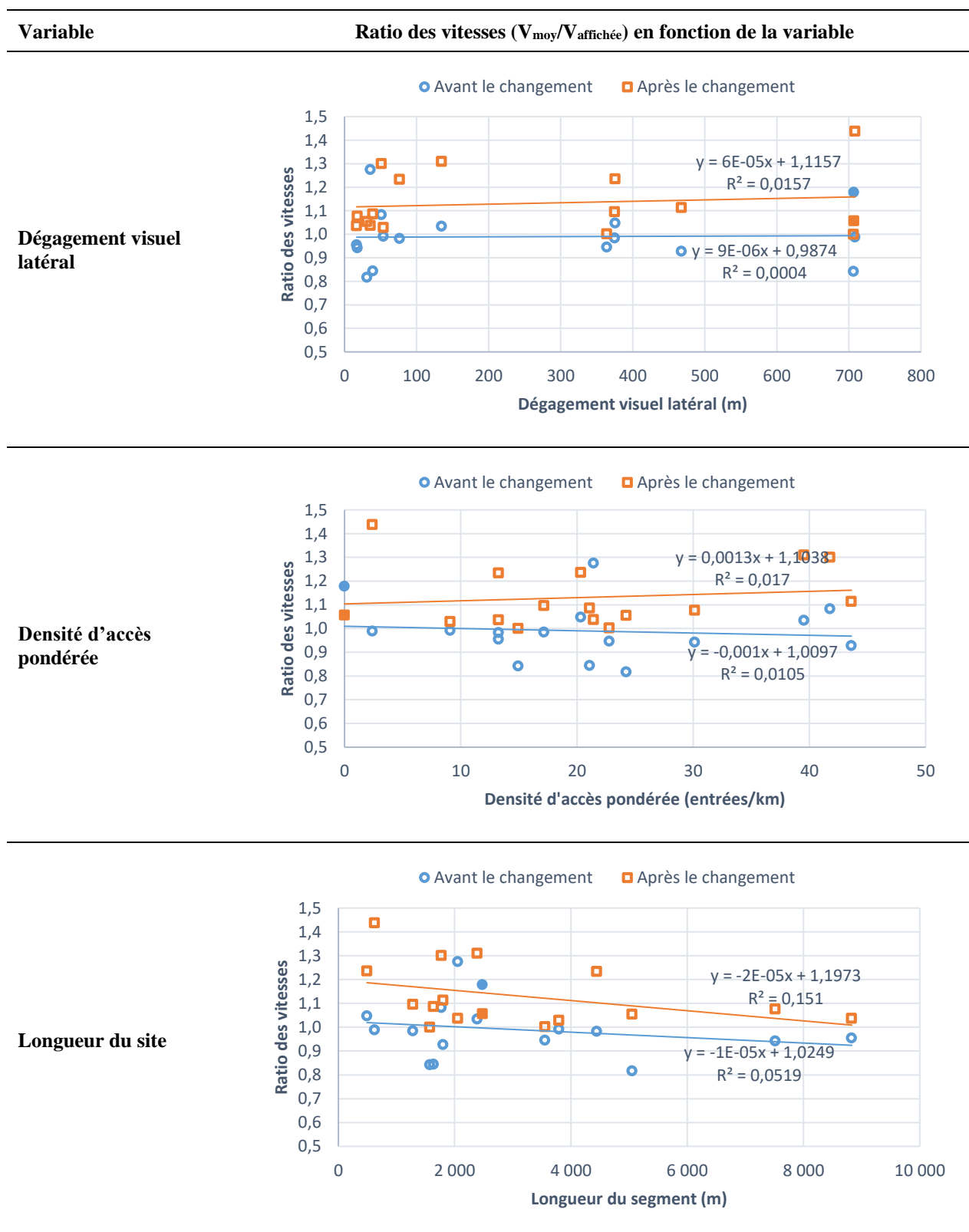
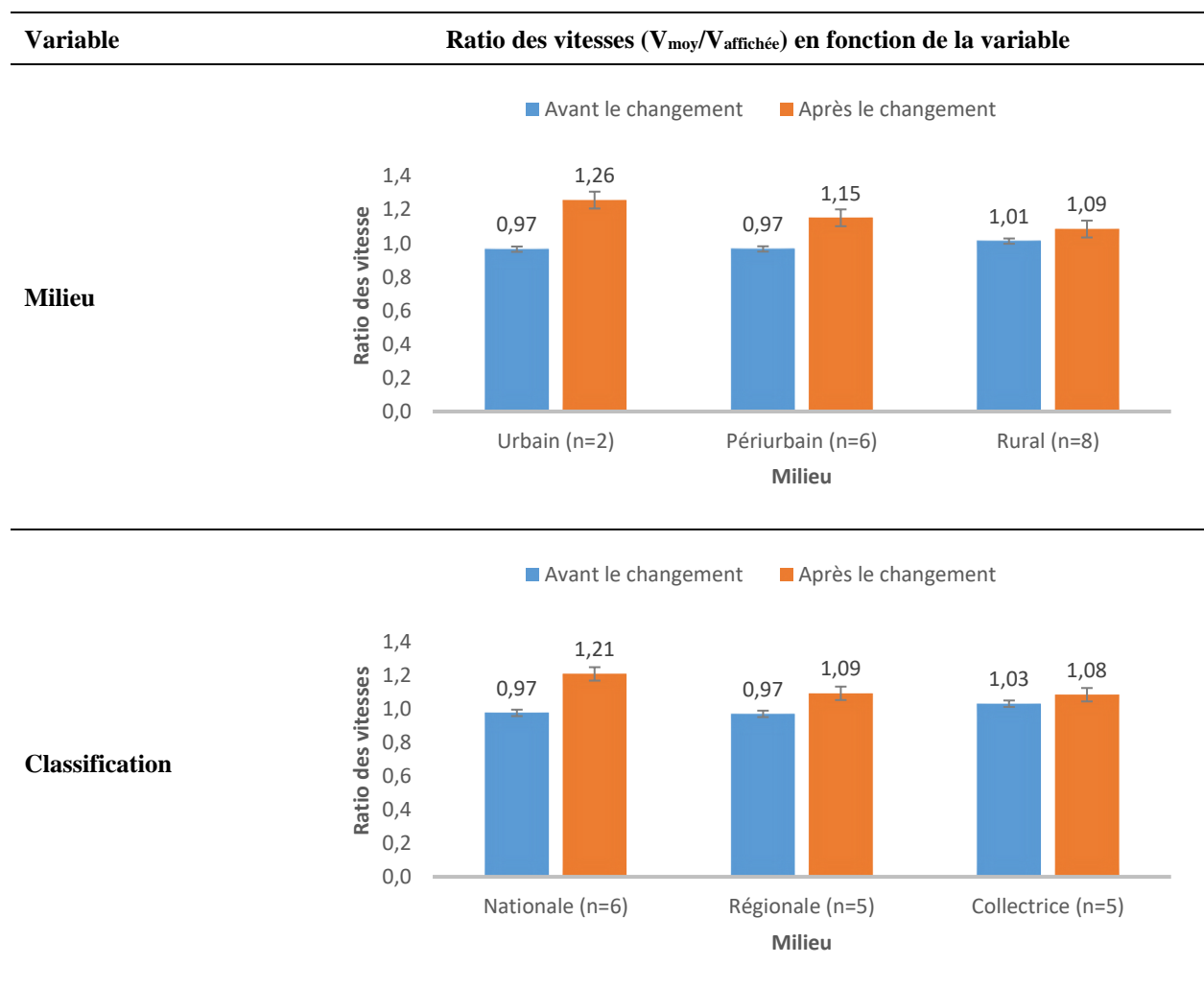


Tableau 3.11 : Ratio des vitesses en fonction des caractéristiques de la route avant et après le changement de limite de vitesse (fin)



Pour toutes les variables et tous les sites, à l'exception de deux sites, le ratio des vitesses après le changement est plus élevé que celui avant le changement, ce qui veut dire que le changement de la limite de vitesse est plus élevé que le changement observé dans les vitesses moyennes pratiquées avant et après le changement. Pour la largeur de la chaussée, il n'y a pas de relation claire entre cette variable et le ratio puisqu'il y a beaucoup de dispersion des points. Les droites de régression ont une pente quasi nulle, avant et après le changement, ce qui laisse supposer que la vitesse pratiquée n'est pas liée à la largeur de la chaussée. Cependant, la largeur moyenne des voies est associée au ratio des vitesses. Plus la voie est large, plus le ratio est élevé, ce qui veut dire que la limite de vitesse est moins bien respectée en présence de voie large.

Le dégagement visuel latéral ne présente pas de relation avec le ratio. Sur la figure, les sites semblent être divisés en trois groupes : moins de 150 m, 350 m à 500 m et 700 m et plus. Le deuxième et le troisième groupe correspondent à des sites pour lesquels un ou les deux côtés de la route n'ont pas d'écran visuel. Ces groupes ne semblent pas montrer de relation entre le dégagement visuel latéral et le ratio, toutefois, il y a une légère augmentation du ratio pour le premier groupe (dégagement visuel latéral de 150 m et moins). Ensuite, la relation entre le ratio des vitesses et la densité d'accès ne montre pas de tendance claire. Il y a une légère diminution des ratios avant le changement et une légère augmentation des ratios après le changement, ce qui se contredit. Par la suite, la longueur du site est associée à une baisse du ratio des vitesses, ce qui est en cohérence avec le modèle du ratio au niveau des sites-relevés du groupe cas-1. Ce constat signifie que les conducteurs ont tendance à moins excéder les limites de vitesse sur des segments de route plus longs. Un segment de route d'un site est représenté par une seule limite de vitesse. Ainsi, les changements de limite de vitesse trop fréquents le long d'une route pourraient influencer le comportement des conducteurs face à la limite de vitesse imposée. De plus, la proximité du relevé de vitesse au point de changement de la limite de vitesse (panneau de vitesse) donne moins de temps aux conducteurs pour ajuster leur vitesse.

Le milieu de la route ne semble pas lié au ratio des vitesses avant le changement, mais il y a une légère association après le changement. Le ratio après le changement est plus élevé en milieu urbain qu'en milieu rural. En milieu urbain, les limites de vitesse sont généralement plus faibles qu'en milieu rural, ainsi le ratio pourrait être plus sensible aux faibles variations des vitesses pratiquées moyennes. Par exemple, un excès de 5 km/h sur une route avec une limite de vitesse de 50 km/h a plus d'effet sur le ratio qu'un excès de 5 km/h sur une route de 90 km/h. Finalement, la classification de la route ne semble pas être liée au ratio avant le changement, mais une légère association après le changement est observée. Le ratio des vitesses après le changement est plus élevé pour les routes nationales que pour les routes régionales ou collectrices.

3.4 Synthèse des résultats

L'objectif principal de cette section était de comprendre et de quantifier l'effet du changement de limite de vitesse, des caractéristiques géométriques de la route et de l'environnement routier sur le comportement de vitesse des conducteurs. Pour évaluer le comportement, quatre indicateurs de performance ont été utilisés : la vitesse moyenne pratiquée, le 85^e centile des vitesses pratiquées,

la proportion de contrevenants et le ratio des vitesses. Le ratio des vitesses est un indicateur très intéressant pour comparer des sites qui n'ont pas la même limite de vitesse.

Avant d'évaluer le comportement des conducteurs, une analyse des vitesses pratiquées dans le temps est faite pour identifier la présence de tendances temporelles ou de variation importante du ratio dans le temps. Aucune variation importante dans le temps n'est observée entre 2000 et 2017 pour les sites étudiés. Pour les sites témoins, une légère diminution du ratio est constatée et significative. Pour les sites cas, une légère diminution du ratio est observée pour les relevés de vitesse avant le changement et, à l'inverse, une légère augmentation du ratio est observée pour les relevés après le changement, toutefois ces observations ne sont pas statistiquement significatives. Les ratios des vitesses sont plus élevés après le changement qu'avant le changement. La grande majorité des sites cas sélectionnés, soit 84 %, ont connu une diminution de leur limite de vitesse, ce qui permet de présager que les vitesses pratiquées des conducteurs ne baissent pas dans la même proportion que la diminution de la limite de vitesse. En effet, cette constatation est également observée dans l'analyse des différentiels des vitesses pratiquées. La conclusion principale de cette analyse est que le différentiel des vitesses pratiquées moyennes n'est pas proportionnel au différentiel des vitesses affichées. Ainsi, une diminution de 10 km/h de la limite de vitesse n'entraîne pas systématiquement une diminution de 10 km/h de la vitesse moyenne des conducteurs. Le tableau 3.12 présente les principaux résultats de l'effet du changement de limite de vitesse sur les vitesses pratiquées moyennes.

Tableau 3.12 : Résumés de l'effet du changement de limite de vitesse sur les vitesses moyennes pratiquées

	Diff Limite	Diff Vmoy	Diff Vmoy / Diff Limite (%)
↑	+ 30 km/h	+ 1,0 km/h	3,3 %
	+ 20 km/h	+ 6,5 km/h	32,5 %
	+ 10 km/h	+ 0,3 km/h	3,0 %
↓	- 10 km/h	- 2,5 km/h	25,0 %
	- 20 km/h	- 4,3 km/h	21,5 %
	- 30 km/h	- 10,3 km/h	34,3 %
	- 40 km/h	- 27,7 km/h	69,3 %

Selon les résultats, une diminution de 10 km/h de la limite de vitesse entraîne en moyenne une diminution de 2,5 km/h, ce qui équivaut à 25 % de la diminution souhaitée. Une diminution de 20

km/h de la limite de vitesse entraîne une diminution moyenne de 4,3 km/h des vitesses pratiquées. Pour les augmentations des limites de vitesse, on s'attendrait à une augmentation plus marquée des vitesses pratiquées, pourtant, tout comme les diminutions, une augmentation de 10 km/h n'entraîne pas une augmentation de 10 km/h des vitesses moyennes pratiquées. Dans cette étude, la vitesse moyenne pratiquée a augmenté en moyenne de 0,3 km/h pour cette catégorie d'augmentation. Les vitesses moyennes avant le changement étaient déjà élevées comparativement à la limite, ainsi le changement de la vitesse affichée semble refléter les comportements qui étaient déjà en place chez les automobilistes. Toutefois, il faut porter une attention particulière au petit nombre de sites ayant subi une augmentation.

Tout comme les vitesses moyennes pratiquées, les 85^e centiles des vitesses pratiquées ont également subi des variations non proportionnelles au différentiel des limites de vitesse.

Tableau 3.13 : Résumés de l'effet du changement de limite de vitesse sur les 85^e centiles des vitesses pratiquées

	Diff Limite	Diff V85	Diff V85 / Diff Limite (%)
↑	+ 30 km/h	0,0 km/h	0,0 %
	+ 20 km/h	+ 3,3 km/h	16,5 %
	+ 10 km/h	- 1,4 km/h	- 14,0 %
↓	- 10 km/h	- 3,2 km/h	32,0 %
	- 20 km/h	- 3,8 km/h	19,0 %
	- 30 km/h	- 13,8 km/h	46,0 %
	- 40 km/h	- 33,3 km/h	83,3 %

Une diminution de 10 km/h de la limite de vitesse entraîne une diminution de 3,2 km/h du 85^e centile des vitesses, soit 32 % de la diminution souhaitée. Une diminution de 20 km/h de la limite entraîne une diminution de 3,8 km/h du 85^e centile. Toutefois, la médiane de ces deux catégories de diminution est de zéro ce qui signifie que pour plus la moitié des sites, il n'y a aucun changement de la vitesse moyenne pratiquée. Pour ce qui est des augmentations, les mêmes interprétations que pour les vitesses moyennes pratiquées peuvent être faites. L'augmentation de 10 km/h résulte d'une diminution de 1,4 km/h du 85^e centile des vitesses. Ce résultat peut sembler étrange, toutefois, il est à noter que pour plus de 75 % de ces sites, aucun changement du 85^e centile des vitesses pratiquées n'a été observé.

Ensuite, l'indicateur de performance de la proportion de contrevenants est utilisé pour évaluer le pourcentage de conducteurs excédant les limites de vitesse avant et après la modification de la limite de vitesse. Selon cette analyse, une augmentation de la limite de vitesse résulte d'une diminution de la proportion de contrevenants et, inversement, une diminution de la limite de vitesse provoque une augmentation de la proportion de contrevenants. En général, plus le différentiel de la limite de vitesse est grand, plus le différentiel de contrevenants est élevé. En d'autres mots, le nombre de conducteurs, qui dépassent les limites de vitesse, va subir une augmentation plus importante pour une diminution des limites de vitesse de 20 km/h, que pour une diminution de 10 km/h. Ces constats sont en accord avec le comportement attendu.

Pour ce qui est de l'effet des caractéristiques géométriques de la route et de l'environnement routier sur le comportement des conducteurs, deux types d'analyse sont faits sur les sites cas : des modèles de régression linéaire sur le groupe cas-1 et une analyse descriptive sur le groupe cas-2. Le premier modèle de régression linéaire tente de prédire la vitesse pratiquée moyenne après le changement des conducteurs selon le différentiel de limite de vitesse, la classification de la route, la vitesse pratiquée moyenne avant le changement et la présence d'un terre-plein latéral. Selon le modèle, la présence d'un terre-plein latéral réduit de 8 km/h la vitesse pratiquée moyenne après le changement. Également, les conducteurs circulant sur une route nationale ou collectrice ayant subi une diminution de la limite de vitesse de 30 km/h seraient plus enclins à augmenter leur vitesse pratiquée dans ces conditions. Le deuxième modèle tente de prédire le différentiel du ratio des vitesses selon le différentiel des limites de vitesse et la limite de vitesse avant le changement, pour les sites ayant subi une diminution de la vitesse affichée. Selon le modèle, le différentiel du ratio est toujours positif, ce qui veut dire que dans toutes les situations de diminution de la limite de vitesse, le ratio va augmenter. Le différentiel du ratio est plus élevé pour les sites ayant une limite avant le changement de 70 km/h, et ce, pour tous les différentiels de limites de vitesse. La plus faible augmentation du ratio est pour les sites où la limite passe de 90 km/h à 80 km/h. Les troisième et quatrième modèles sont similaires. Ces modèles tentent de prédire le ratio des vitesses et le pourcentage de contrevenants selon le moment du relevé de vitesse, la limite de vitesse, la classification, la présence d'un terre-plein latéral, la longueur du site et la présence de marquage pour une zone de dépassement. La présence d'un terre-plein latéral semble être bénéfique pour le respect des limites, puisque selon le modèle, elle permet de diminuer de 36 points de % la proportion de contrevenants. À l'inverse, la présence de marquage pour une zone de dépassement

augmente le pourcentage de contrevenant et par le fait même le ratio des vitesses. Dans ces modèles, aucune tendance temporelle n'est observée : l'année du changement de limite de vitesse ou la durée du temps écoulé entre, le relevé et le changement de limite de vitesse n'ont pas d'impact sur le comportement des conducteurs.

L'analyse descriptive du comportement des conducteurs selon les caractéristiques du site pour le groupe cas-2 permet d'évaluer d'autres caractéristiques qui ne sont pas disponibles pour l'autre groupe cas. Selon cette analyse, plus la voie de circulation est large, plus le ratio des vitesses est élevé. En d'autres mots, les conducteurs ont tendance à moins respecter les limites de vitesse en présence de voies de circulation larges. Inversement, la longueur du site, soit la longueur de la même zone de limite de vitesse, est associée à une baisse du ratio, ce qui voudrait dire que moins il y a de changement de la limite de vitesse sur une même route, plus les conducteurs ont tendance à ajuster leur vitesse à la limite affichée.

CHAPITRE 4 DÉPASSEMENTS DES CYCLISTES

Tel que discuté précédemment, le choix de la vitesse pratiquée par les conducteurs est influencé par de nombreux facteurs comme la limite de vitesse et certaines caractéristiques de la route. Dans cette section, on observe et analyse le comportement des conducteurs en présence de cyclistes, plus précisément lors des dépassements. Est-ce que les automobilistes réduisent leur vitesse en présence de cyclistes ? Est-ce que les conducteurs respectent la réglementation de la distance minimale prescrite entre leur véhicule et le cycliste lors d'un dépassement ?

Depuis 2016, un nouveau règlement a été ajouté au Code de la sécurité routière pour protéger les cyclistes. Le code stipule que les conducteurs d'un véhicule peuvent dépasser un cycliste uniquement s'ils respectent ces deux conditions :

- 1) réduire la vitesse de leur véhicule ; et
- 2) maintenir une distance sécuritaire entre leur véhicule et le cycliste tout le long du dépassement.⁴

Sur les routes de plus de 50 km/h, la distance prescrite est de 1,5 m et sur les routes de moins de 50 km/h, la distance prescrite est de 1,0 m. Si une des deux conditions n'est pas respectée, le dépassement est interdit puisqu'il est considéré comme une manœuvre dangereuse, sous peine d'une amende et de deux points d'inaptitude. Mais, concrètement, comment mesurer les distances de dépassement ? Cette étude propose de développer et tester un outil d'automatisation pour mesurer les vitesses et les distances de dépassement à partir d'un système de traitement d'images vidéo. Cette section présente le système utilisé, ainsi que la méthodologie employée pour extraire les données de vitesse et de distance. Ensuite, une évaluation de la performance de l'outil est présentée, suivi des résultats de l'automatisation des mesures des vitesses et des distances de dépassement sont présentés. Pour finir, une synthèse des principaux résultats est fournie.

4.1 Système de traitement d'images vidéo

La vision par ordinateur est un domaine de l'intelligence artificielle. Le rôle de l'ordinateur est de traiter, d'analyser et d'interpréter des images provenant de différents systèmes d'acquisition, tels

⁴ CSR (C-24.2, r. 341) : <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cs/C-24.2>

qu'une caméra vidéo. L'automatisation des systèmes de traitement d'images vidéo a un potentiel immense en ce qui a trait à la collecte automatique de données, mais également à l'analyse automatique des flux de trafic. En circulation, les caméras vidéo permettent de recueillir une quantité importante d'informations essentielles, telles que des données de vitesse, des débits de circulation et des interactions entre les usagers de la route.

Dans cette étude, on s'intéresse principalement aux vitesses pratiquées par les usagers et à la distance entre deux objets, soit entre la voiture et le vélo, afin d'évaluer la sécurité des dépassements et le comportement des conducteurs. Cette sous-section présente la méthodologie employée pour la création d'un outil automatique de collecte de données vidéo et d'analyse afin de répondre aux objectifs de l'étude.

4.1.1 Vue d'ensemble du système

Le système doit répondre aux deux exigences de l'étude : mesurer les vitesses des usagers dans le champ de vision de la caméra et mesurer des distances de dépassement entre les cyclistes et les automobilistes. Pour réaliser l'objectif du projet, le système doit permettre la collecte des données des trajectoires des usagers de la route à grande échelle et doit mesurer avec un haut degré de précision les positions spatiales des usagers et véhicules en mouvement. Un système de vision par ordinateur est utilisé pour automatiser le processus d'extraction des trajectoires des usagers de la route. Également, des algorithmes sont exploités dans l'ensemble des étapes du système afin d'automatiser la classification des usagers, l'extraction des données de vitesse et de distance de dépassement. Malgré les algorithmes, le système n'est pas entièrement automatisé puisque l'utilisateur doit manuellement faire quelques opérations de calibration à chaque nouvelle installation d'une caméra.

Le système collecte et traite les données vidéo en six étapes.

1. Pour commencer le processus, des données vidéo peuvent être collectées au terrain à partir de caméra de trafic déjà en place sur le site où à partir d'une installation temporaire d'une caméra. Il est important de s'assurer de la bonne installation de la caméra pour éviter les vibrations dues au vent ou au passage des véhicules (sur un pont par exemple) lors de la collecte de données.

2. la caméra est calibrée dans le système pour corriger la distorsion des lentilles et pour assurer une représentation spatiale des usagers dans un système orthonormé de coordonnées au niveau du sol.
3. Les paramètres de la caméra et des métadonnées du site permettent au système d'extraire des trajectoires des usagers de la route à partir d'un algorithme de détection et de suivi des points d'intérêt (« *feature-based tracking* »). À cette étape, l'algorithme identifie des objets en mouvement dans les images, qui sont représentés par des trajectoires.
4. L'étape suivante vise à classifier ces objets en mouvement par type d'usagers de la route (véhicule, cycliste, piéton).
5. Une fois ces données extraites des images vidéo, un premier algorithme est utilisé pour comparer les mesures de vitesse des véhicules extraites du système à celles collectées par un autre outil au terrain. Cette étape optionnelle permet uniquement d'évaluer la performance du système.
6. Finalement, un dernier algorithme est utilisé pour mesurer automatiquement les distances de dépassement entre les cyclistes et les automobilistes.

4.1.2 Procédure de collecte de données et équipement

Les données sont essentielles afin d'évaluer la performance de l'outil et de tester ses fonctionnalités. Deux types de données ont été collectés sur le terrain : des données vidéo et des données de vitesse. Les données vidéo sont des données entrantes du système de traitement d'images, tandis que les données de vitesse collectées sont des données externes provenant d'une autre méthode d'acquisition, soit un capteur pneumatique.

4.1.2.1 Données vidéo

La qualité des données vidéo a une incidence directe sur la qualité des résultats générés par le système. Tout d'abord, la vidéo collectée doit avoir une résolution adéquate afin d'identifier, en tout temps, suffisamment de points d'intérêt sur les usagers de la route. Une résolution élevée augmente la précision des mesures de distance et de suivi, mais est aussi coûteuse en termes de temps de calcul et d'espace de stockage. Ainsi, un compromis doit être fait entre la qualité et ces coûts selon l'utilisation faite. Également, le nombre d'images par seconde (IPS) enregistré par la

caméra doit être suffisamment élevé pour qualifier les trajectoires des usagers de la route. Plus le nombre d'images est élevé, plus les trajectoires sont fluides et précises. Cependant, tout comme la résolution, le nombre d'IPS affecte le temps de calcul du système. La fréquence d'image des dispositifs varie entre 15, 30 et 60 images par secondes, et peut atteindre, à l'occasion, des valeurs plus élevées. Par exemple, à 30 IPS, un véhicule qui a une vitesse constante de 30 km/h va subir un déplacement de 0,3 m entre chaque image. Ainsi, un minimum de quatre images est nécessaire pour observer un déplacement d'un mètre.

Dans cette étude, une caméra ordinaire, enregistrant dans la lumière visible, est utilisée. Il est à noter que d'autres types de caméras peuvent être utilisés, tel qu'une caméra thermique. La caméra utilisée est une GoPro Hero 3+, d'une résolution de 1280 x 720 pixels et d'une fréquence d'image de 30 IPS. Afin de collecter les données vidéo, la caméra a été installée en hauteur pour permettre un champ de vision élargie. La caméra a été installée au bout d'un poteau télescopique, qui a été attaché à un lampadaire en bordure de route. Le poteau a été sécurisé à l'aide de cordes et de sangles pour éliminer les vibrations dues aux vents. Des chaînes ont, également, été utilisées par mesure préventive contre le vandalisme ou le vol. La hauteur de la caméra était d'environ 5 m et la caméra était légèrement inclinée afin d'avoir un bon visuel sur la zone d'intérêt, d'environ 10 m de long. La hauteur et l'inclinaison peuvent varier d'une installation à l'autre, l'étape de calibration de la caméra va permettre la correction de la distorsion et la correspondance entre les points de l'image de la caméra et ceux l'espace réel.

4.1.2.2 Données de vitesse

Les données de vitesse ne font pas partie des données entrantes essentielles au système. Elles ont été collectées sur le terrain afin de comparer les deux systèmes de collecte de données de vitesse. Les vitesses ont été mesurées à partir de tubes pneumatiques installés sur la chaussée. La procédure d'installation est expliquée à la section 3.1.3.1 à la page 45. Les tubes pneumatiques ont été installés sur la chaussée dans le champ de vision de la caméra. Aucun nettoyage de la base de données des vitesses collectées par les tubes pneumatiques n'est fait, puisque les données seront comparées directement aux données de vitesses mesurées par le système d'analyse vidéo.

4.1.3 Calibration de la caméra

L'objectif de la calibration est d'associer des coordonnées spatiales des points de l'espace réel aux points de l'image de la caméra. La calibration, aussi appelée l'étalonnage, est l'une des parties les plus importantes dans l'extraction des positions puisqu'elle a un impact direct sur la qualité des données générées par le système. Une calibration pauvre ne permet pas de mesurer avec précision les vitesses et les distances de dépassement. L'étalonnage se fait en deux étapes : la correction de la distorsion des lentilles et la projection des objets de l'image caméra dans un système de coordonnées réelles.

4.1.3.1 Correction de la distorsion des lentilles

De nombreux objectifs de caméra déforment légèrement les images, ce qui ne permet pas d'utiliser une simple transformation affine d'un plan dans l'autre. Une erreur dans les coordonnées affecte la précision des trajectoires des objets. Ainsi, pour de meilleurs résultats, l'image de la caméra doit être corrigée. Un exemple de l'effet de la distorsion de la lentille de la caméra se manifeste par la présence d'une ligne qu'y n'apparaît pas droite dans l'image de la caméra, mais qu'y est en réalité droite dans le vrai monde. Pour corriger la distorsion, une transformation géométrique de l'image est requise. Cette transformation se fait à partir des paramètres intrinsèques de la caméra et des coefficients de distorsion. La matrice K représente les paramètres intrinsèques de la caméra.

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Les paramètres intrinsèques sont des données propres à la caméra. Les distances focales de la caméra en x et y sont représentées par les variables f_x et f_y . Les coordonnées du centre optique de la caméra sont représentées par c_x et c_y . Il existe deux types de distorsion des lentilles : la distorsion radiale et le décentrement (Sun & Yang, 2015). Le vecteur des coefficients de distorsion prend la forme suivante.

$$\text{Coeff. distorsion} = [k_1 \quad k_2 \quad p_1 \quad p_2 \quad k_3] \quad (4.2)$$

Où k_1 , k_2 et k_3 sont les coefficients de la distorsion radiale et p_1 et p_2 sont les coefficients de la distorsion tangentielle. Pour corriger la distorsion radiale, les formules suivantes sont utilisées :

$$u = x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \quad (4.3)$$

$$v = y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \quad (4.4)$$

Puis, la distorsion tangentielle est corrigée à partir de ces équations :

$$u = x + [2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \quad (4.5)$$

$$v = y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy] \quad (4.6)$$

Où u, v sont les coordonnées de l'image originale, non corrigée et x, y sont les coordonnées non déformées de l'espace réel. La distance radiale r est la distance séparant un point quelconque (u, v) du centre de l'image, qui est défini par les coordonnées c_x et c_y .

$$r(u, v) = \sqrt{(u - c_x)^2 + (v - c_y)^2} \quad (4.7)$$

4.1.3.2 Projection de l'image caméra dans l'espace réel

Une fois la distorsion de l'image corrigée, une projection des points est faite de l'image en deux dimensions à l'espace réel en trois dimensions, aussi appelé le monde. Cette projection permet d'obtenir des coordonnées euclidiennes aux objets présents dans l'image vidéo. Le modèle utilisé pour la calibration est le modèle du sténopé, mieux connu en anglais par le modèle du *pin-hole* (Ismail, Sayed, & Saunier, 2013). Ce modèle nécessite l'utilisation des paramètres intrinsèques et extrinsèques de la caméra.

$$P = K[R \ T] \quad (4.8)$$

La projection des points est représentée par une matrice \mathbf{P} , où \mathbf{K} est la matrice des paramètres intrinsèques de la caméra et les deux autres variables sont des paramètres extrinsèques, soit la matrice de rotation \mathbf{R} et le vecteur de translation \mathbf{T} .

L'homographie est une transformation mathématique des coordonnées qui a pour objectif de projeter des points d'un système de coordonnées à un autre. Le concept est présenté à la figure 4.1.

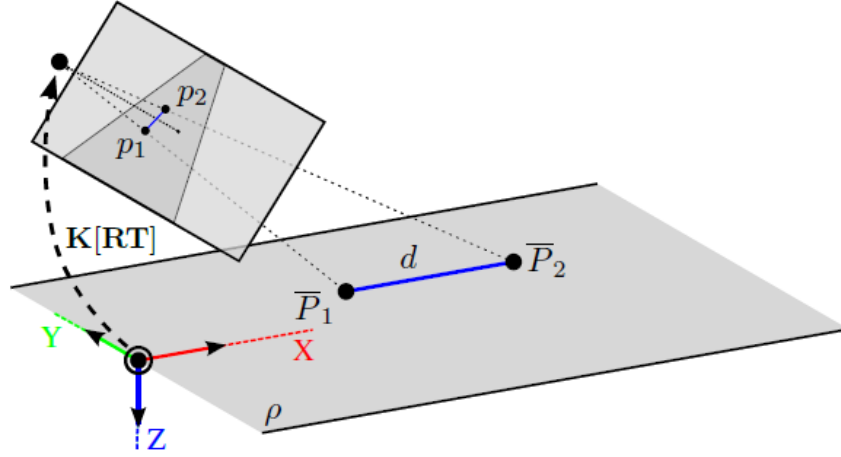


Figure 4.1 : Projection des points de l'image dans l'espace monde (Sochor et al., 2018)

© 2018 IEEE

Les points p_1 et p_2 , dans le système de coordonnées de l'image caméra corrigée, sont projetés dans le système de coordonnées de l'espace réel dans le plan au niveau du sol respectivement aux points (\bar{P}_1, \bar{P}_2) . La distance entre deux points (d) est mesurée à partir de la projection des points dans l'espace réel. L'homographie \mathbf{H} est une matrice 3x3 qui permet de projeter des points d'un plan dans un autre plan. La transformation des coordonnées d'un point i se fait à partir de cette relation.

$$s \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

Où (u_i, v_i) sont les coordonnées de l'espace réel et (x_i, y_i) sont les coordonnées de l'image (Zhang, 2000).

4.1.4 Détection et suivi des usagers

Cette section présente les hypothèses et les méthodes utilisées pour extraire les trajectoires des usagers de la route à partir des données vidéo. Ce système utilise un algorithme de vision par ordinateur qui permet de suivre le mouvement des objets à partir des pixels de l'image de la caméra et fait la projection des positions des objets dans le système de coordonnées du monde réel à l'aide de l'homographie.

Il existe cinq approches de détection et de suivi des usagers de la route : les suivis basés sur les modèles, l'apparence, des détecteurs d'objets, le contour et les points d'intérêt (voir section 2.5

p.32). L'approche de suivi basé sur les points d'intérêt (*feature-based tracking*) est celle utilisée, plus spécifiquement, il s'agit de la méthode de suivi de Kanade-Lucas-Tomasi (Tomasi & Kanade, 1991). Cette méthode a été implémentée dans une application de trafic, *Traffic Intelligence*, dont le code est disponible sous une licence libre⁵.

L'approche de suivi basé sur les points d'intérêt est intéressante puisqu'elle permet de gérer les occlusions partielles, ce qui est un problème majeur dans ce domaine (Saunier & Sayed, 2006). L'idée de cette approche est de suivre dans un premier temps des points d'intérêt et non les objets. Un véhicule peut posséder une multitude de points d'intérêt. La difficulté de cette approche est de regrouper des points d'intérêt afin de représenter un objet, qui est un usager de la route. Les indices pour le regroupement sont la proximité des points d'intérêt et la similarité du mouvement. La figure 4.2 illustre un exemple du suivi des points d'intérêt d'une voiture et la figure 4.3 du regroupement des points d'intérêt.



Figure 4.2 : Exemple de suivi des points d'intérêt

⁵ Traffic Intelligence : <https://bitbucket.org/Nicolas/trafficintelligence>



Figure 4.3 : Exemple du regroupement des points d'intérêt

Le système fait un suivi des points d'intérêt individuels en mouvement sur une séquence d'images vidéo, aussi longtemps que le point n'est pas stationnaire. Ce suivi permet d'obtenir les trajectoires des points d'intérêt représentées par des lignes de couleur (figure 4.2). Puis, la ligne bleue de l'image de la figure 4.3, représente la trajectoire moyenne des positions des points d'intérêt de l'objet en mouvement. Le regroupement des points d'intérêt représente la position du centre de l'objet. Cependant, le nombre de points d'intérêt n'est pas le même d'une image à l'autre, ainsi la position du centroïde de l'objet peut changer abruptement. La position centre de l'objet est une statistique utilisée dans les opérations du système dû à la facilité des manipulations. Toutefois, il faut porter une attention particulière à la qualité de cette donnée puisqu'elle est affectée par la distribution des points d'intérêt.

Le système collecte des trajectoires individuelles des points d'intérêt et les regroupe pour former une trajectoire globale de l'objet. Les trajectoires sont une séquence de positions successives dans le temps. Les données de positions sont des points représentés dans un système de coordonnées x, y au niveau du sol. Chaque point dans l'espace est associé à un instant t . Le temps entre deux points est implicite puisqu'il provient de la fréquence d'image de la vidéo. Par exemple, pour une fréquence de 30 IPS, la durée entre deux images est de $1/30 \text{ IPS} = 0,033 \text{ s}$. Ces données permettent au système de calculer la vitesse de l'objet à chaque instant. Le vecteur de vitesse est calculé à partir du différentiel de positions en x et en y de points successifs $(v_{i,x}, v_{i,y})$, puis filtré par moyenne mobile.

$$v_{i,x} = \frac{p_{i,x+1} - p_{i,x}}{\Delta t} \quad (4.10)$$

$$v_{i,y} = \frac{p_{i,y+1} - p_{i,y}}{\Delta t} \quad (4.11)$$

Le système génère automatiquement une base de données contenant quatre tables : les objets (*objects*), la table de correspondance entre les points d'intérêt et l'objet (*objects-features*), les positions (*positions*) et les vitesses (*velocities*). Le schéma de cette base de données est illustré à la figure 4.4.

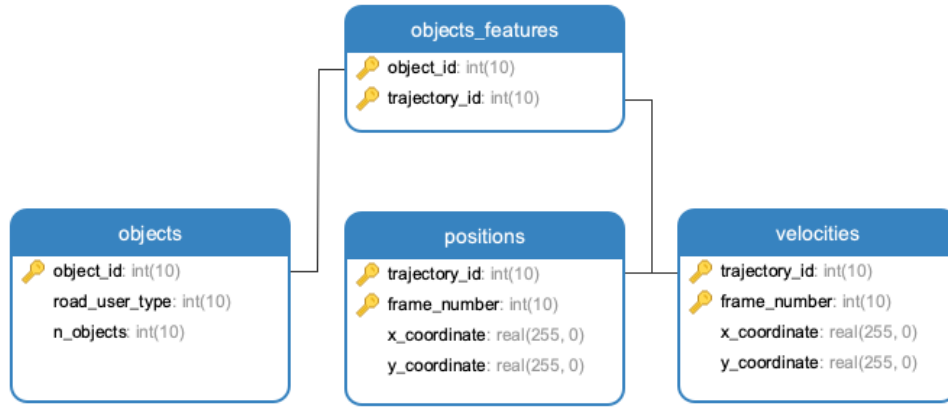


Figure 4.4 : Schéma de la base de données

Ainsi, pour chaque trajectoire d'un point d'intérêt, un numéro d'objet lui est attribué. La table d'objet contient des informations sur la classification de l'utilisateur de la route et le nombre d'objets. À cette étape, la colonne de classification des objets est remplie par « type inconnu ». Un type connu d'utilisateur lui sera attribué par l'algorithme de classification à l'étape suivante. Les tables de positions et de vitesses contiennent les positions successives (la trajectoire) de chaque point d'intérêt à chaque instant (numéro de l'image).

4.1.5 Classification des usagers

Une fois les objets identifiés, le système procède à la classification des usagers de la route. La prédiction de la classe d'utilisateur combine des modèles de classification basés sur l'apparence des usagers et des vitesses des différentes classes d'utilisateurs.

4.1.5.1 Apparence des usagers

Des modèles d'apprentissage machine sont utilisés pour catégoriser l'apparence des objets selon une des trois classes suivantes : véhicule, cycliste ou piéton. Ces modèles ont été appris par l'ordinateur à partir d'un ensemble de données d'image répertorié par classe d'utilisateur de la route (Zangenehpour, Sohail et al., 2015). Le modèle de classification basée sur l'apparence utilisé se nomme HOG-SVM. Les caractéristiques HOG, histogramme de gradients orientés, sont calculées à partir de l'orientation des gradients dans des blocs de taille fixe dans l'image. Cette technique est principalement utilisée pour la détection des piétons et de véhicules dans les images statiques (Dalal & Triggs, 2005). Ensuite, un modèle SVM, machine à vecteurs de support (*support machine vector*), est appris de façon supervisée. Il s'agit d'un classificateur binaire. Dans la situation où il y a plusieurs classes, la méthode compare deux classes à la fois (Zangenehpour, Sohail et al., 2015).

4.1.5.2 L'analyse du profil de vitesse

En plus de l'apparence des objets, la classification des usagers utilise des profils de vitesse afin de prédire le type d'objet selon la vitesse pratiquée. La figure 4.5 illustre les distributions de vitesses des usagers de la route utilisés dans l'algorithme de classification.

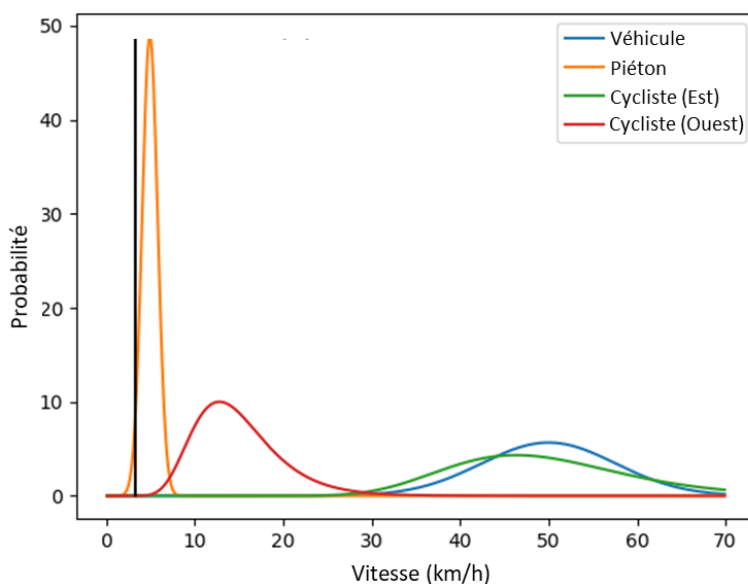


Figure 4.5 : Profils des vitesses des classes d'usagers de la route

Les profils des vitesses des véhicules et des piétons sont des distributions normales de moyenne et d'écart-type de $4,91 \pm 0,88$ km/h et de $50,0 \pm 17,6$ km/h respectivement. Les distributions des

vitesses des cyclistes sont des distributions log-normale. Dans une direction, la moyenne est de 47,03 km/h et l'écart-type de 17,5 km/h. D'autre l'autre direction, la moyenne est de 16,04 km/h et l'écart-type 15,70 km/h. La moyenne est plus élevée dans la première direction, puisque la route est en pente descendante.

La décision globale de classification repose, d'une part, sur la probabilité d'appartenir à une classe selon l'apparence, soit le nombre de classifications instantanées par classe divisé par le nombre d'instant d'existence de l'utilisateur. D'une autre part, elle repose sur la probabilité d'appartenir à une classe selon sa vitesse, qui est déterminée selon les densités de probabilité affichées à la figure 4.5.

4.1.6 Méthode de comparaison automatique des mesures de la vitesse

L'objectif de cette méthode est de comparer la mesure de la vitesse de notre système à celle obtenue par les tubes pneumatiques afin d'évaluer la performance de l'outil vidéo. Les tubes pneumatiques permettent uniquement la mesure ponctuelle de la vitesse tandis que le capteur vidéo permet d'obtenir la vitesse instantanée d'un usager de la route en mouvement à tout instant durant son passage devant la caméra. Pour comparer ses deux mesures de vitesse, il faut déterminer l'instant où l'objet est passé sur les tubes. Cependant, les vitesses de l'utilisateur mesurées par le système vidéo montrent des variations importantes dans le temps (voir la figure 4.6).

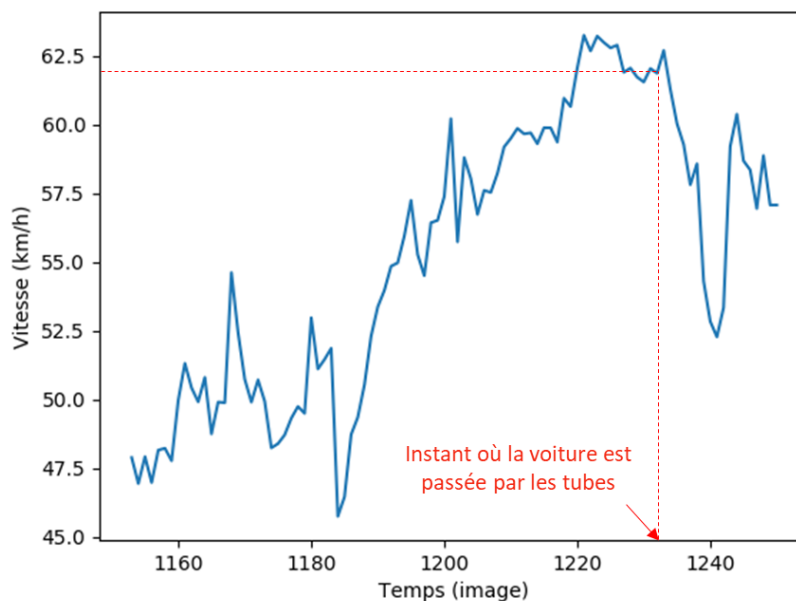


Figure 4.6 : Exemple de la variation de la vitesse d'une voiture dans le temps (taux à 30 IPS)

Dans la figure, l'axe du temps est gradué aux 20 images, ce qui correspond à $20/30 \text{ IPS} \approx 0,7 \text{ s}$. La figure illustre environ 3 s des vitesses pratiquées d'une voiture. Dans ces 3 s, la vitesse de la voiture subit de nombreuses variations, passant de 45 km/h à 63 km/h. Une petite erreur de positionnement de l'objet dans l'image peut engendrer une erreur importante en termes de vitesse. De ce fait, la vitesse instantanée n'est pas considérée dans cette comparaison de la vitesse. Les erreurs seront abordées plus en détail dans l'évaluation de l'outil.

Les capteurs pneumatiques comportent deux tubes qui sont installés à un mètre de distance sur la chaussée. Les tubes mesurent la vitesse selon la distance et la différence de temps de passage entre les deux tubes. Afin de représenter le plus fidèlement possible la mesure des tubes pneumatiques, la mesure de la vitesse faite par cet algorithme vise à cibler une zone d'intérêt autour des tubes et à calculer la vitesse de l'objet dans cette zone. La zone d'intérêt du site à l'étude est illustrée à la figure 4.7.

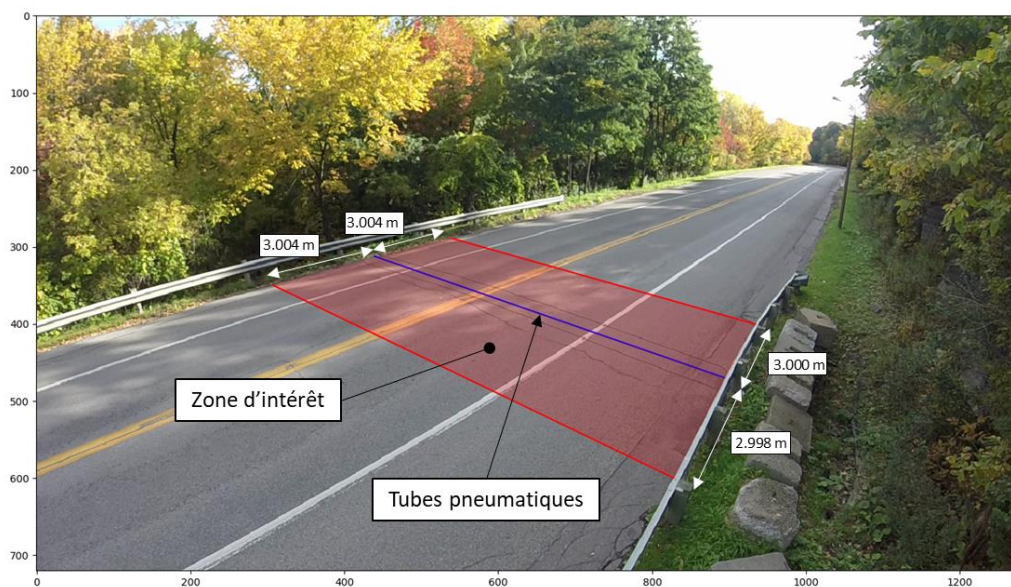


Figure 4.7 : Zone d'intérêt de la mesure comparative de la vitesse des objets par le système

La zone d'intérêt est d'environ 6,0 m de largeur, soit de 3,0 m de chaque côté des tubes pneumatiques. La vitesse de l'objet dans la zone d'intérêt est calculée selon la distance D à parcourir sur la durée à l'intérieur de la zone où t_1 est le premier instant et t_2 est le dernier instant.

$$v_{moy} = \frac{D}{t_2 - t_1} \quad (4.12)$$

Le référentiel de l'objet est son centroïde, puisqu'il s'agit de la position de repère du regroupement de points d'intérêt de l'objet. La position centre de l'objet peut être instable, à l'occasion, due à l'apparition et à la disparition de certains points d'intérêt dans le temps. C'est pourquoi la zone d'intérêt devait être suffisamment large pour permettre à une voiture de dimension standard d'être complètement à l'intérieur de la zone à un certain instant. De cette façon, l'erreur d'instabilité du centroïde est moins importante, ainsi la mesure de la vitesse mesurée par l'algorithme est plus représentative de la vitesse obtenue par les tubes. Une fois la vitesse de la zone d'intérêt calculée, l'algorithme compare les deux mesures de vitesse afin d'évaluer la performance du système. Les erreurs relative et absolue moyennes sont calculées.

4.1.7 Méthode de mesure automatique de la distance de dépassement

L'objectif de cette méthode est de mesurer automatiquement la distance de dépassement d'un cycliste. Un dépassement commence lorsque le nez du véhicule est au niveau de la roue arrière du vélo et se termine lorsque le derrière du véhicule est au niveau de la roue avant du vélo. Cet événement est généralement d'une courte durée. Ainsi, durant un dépassement, il y a plusieurs mesures de distance entre les deux usagers de la route. Pour mesurer ces distances, la position des points d'intérêt de l'objet est utilisée afin de délimiter la surface du sol occupée par l'objet à tout instant durant le dépassement. La figure 4.8 illustre les trajectoires et les positions des points d'intérêt d'une voiture et d'un cycliste avant le dépassement.

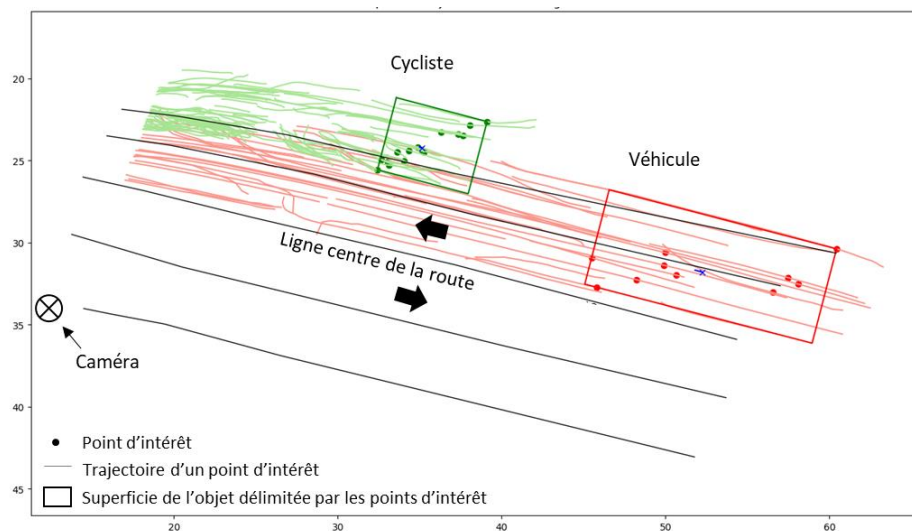


Figure 4.8 : Exemple de trajectoires et de positions des points d'intérêt à un instant dans le système de coordonnées du monde

Le véhicule est en rouge et le cycliste est en vert. Les lignes de couleur représentent les trajectoires des points d'intérêt dans la zone couverte par la caméra et les points de couleur sont les points d'intérêt des objets à un instant donné. Il s'agit d'une projection dans la vue aérienne du site, soit dans le système de coordonnées du monde réel au niveau du sol. Le rectangle de couleur englobe les points d'intérêts à chaque instant, ce qui représente la superficie du sol occupée par l'objet à un instant t . La problématique avec cette figure est qu'il y a une erreur de projection des points d'intérêt qui sont au-dessus du sol et éloignés de la caméra. Cette mauvaise projection est principalement perçue à partir de la largeur des objets. Par exemple, la voiture prend la largeur de sa voie en plus de la largeur de l'accotement, ce qui ne correspond pas à la réalité. Cependant, les points d'intérêt les plus proches de la caméra sont assez bien projetés. Ainsi, l'évaluation des distances de dépassement est limitée à la position de ces points d'intérêt. La position la plus proche de la caméra est déterminée à partir du rectangle englobant les points d'intérêt de l'objet. Cette position est illustrée à la figure 4.9 pour les deux directions.

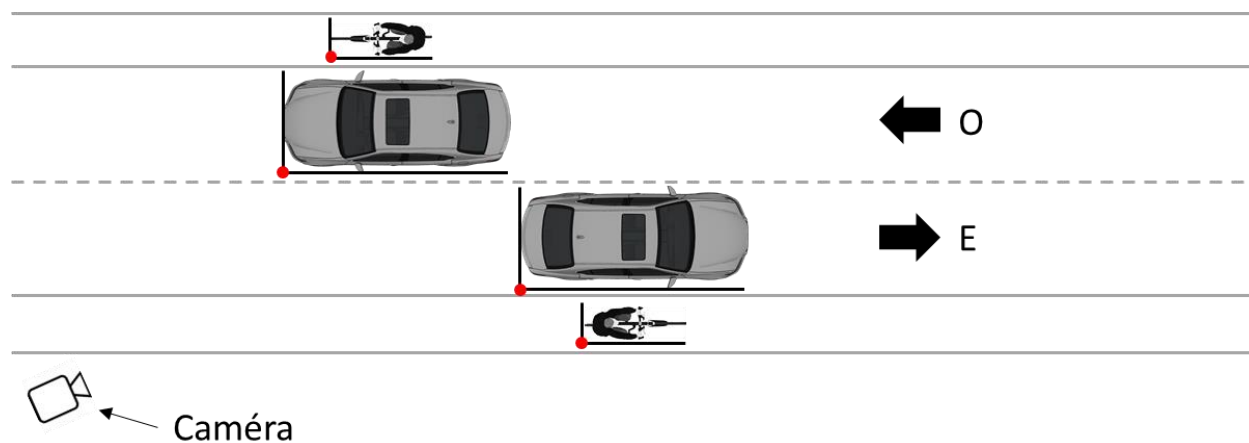


Figure 4.9 : Schéma de la position la plus proche de la caméra

En direction est, la position la plus proche de la caméra est le derrière droit de l'objet et en direction ouest, la position la plus proche de la caméra est le devant gauche de l'objet. La position de l'objet la plus proche de la caméra est projetée selon la ligne centrale de la route. Il s'agit d'une projection des points dans un système de coordonnées curvilignes.

Système de coordonnées curviligne

Dans un système de coordonnées curviligne, les lignes des abscisses peuvent être courbées ce qui le diffère d'un système de coordonnées cartésien. Les coordonnées sont projetées perpendiculairement à l'axe des abscisses, ce qui facilite la mesure de la distance par rapport à la ligne de repère. Les coordonnées curvilignes sont en trois dimensions et prennent la forme suivante :

$$p_{curviligne} = (ligne, S_p, \gamma_p) \quad (4.13)$$

Où ligne représente la ligne de repère du système de coordonnées curviligne. Dans cette étude, la ligne de repère est la ligne centrale de la route. S_p est la distance curviligne du point projeté et γ_p est la distance perpendiculaire à la ligne curviligne. La projection d'un point en coordonnées curvilignes est présentée à la figure 4.10.

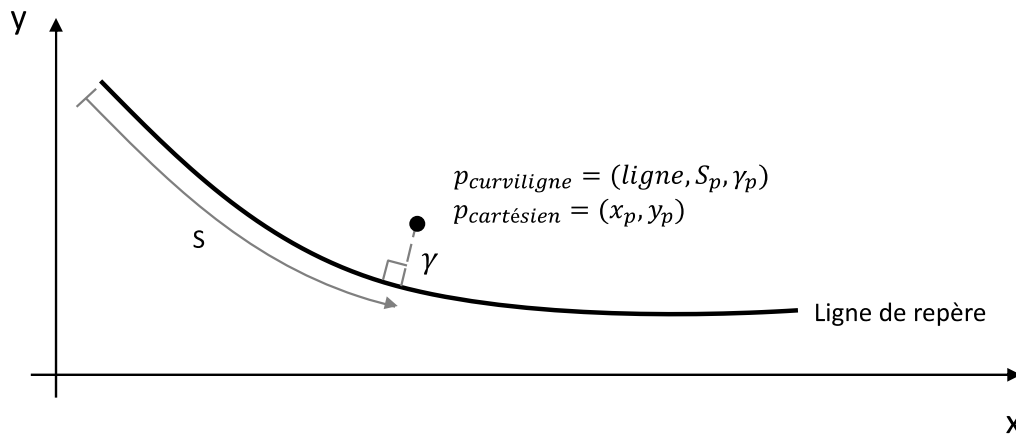


Figure 4.10 : Projection dans un système de coordonnées curvilignes

Lors du dépassement, les distances par rapport à la ligne centrale du véhicule et du cycliste sont comparées afin d'évaluer la distance qui sépare les deux usagers. Étant donné que le point le plus proche de la ligne centrale est retenu pour évaluer le dépassement, des hypothèses pour les largeurs des objets sont nécessaires. Pour les véhicules, l'hypothèse est que la largeur est de 2,0 m et pour les cyclistes, la largeur est de 0,5 m. La figure 4.11 illustre un exemple d'application des hypothèses dans la mesure de la distance de dépassement.

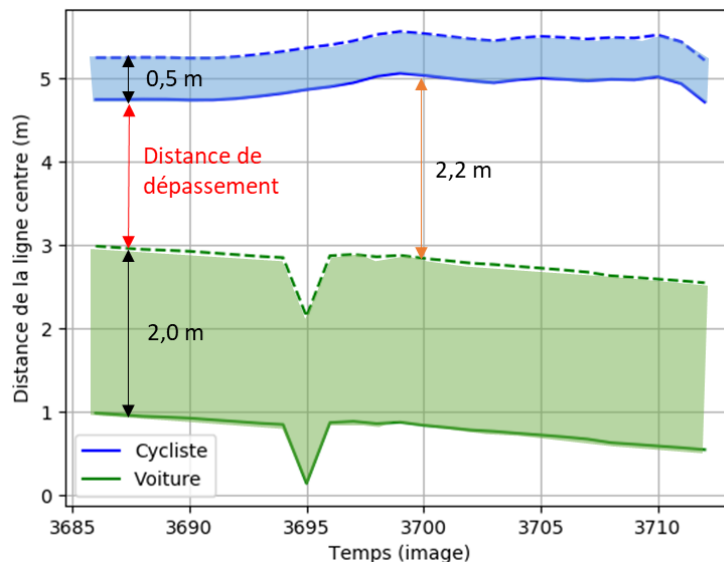


Figure 4.11 : Exemple de distances de dépassement à partir de la distance de la ligne centrale (position latérale) en direction ouest

La figure illustre les distances entre le véhicule et le cycliste tout au long du dépassement. La voiture est en vert et le cycliste est en bleu. Les lignes pleines représentent les positions des objets les plus proches de la caméra et les lignes pointillées délimitent la largeur de l'objet selon les hypothèses de largeur. Lors d'un dépassement, la distance entre le véhicule et le cycliste n'est pas constante, elle prend plusieurs valeurs. Par exemple, à l'instant 3700 s, la distance de dépassement entre les deux usagers est de 2,2 m. Le choix de la distance de dépassement retenu pour l'évaluation du système est abordé plus en détail à la section 4.3.2.

4.2 Évaluation du système

Cette section vise à évaluer la performance et la fiabilité du système automatique. Les algorithmes comportent quelques limitations qui cause des erreurs. Cinq catégories d'erreurs sont présentées : les erreurs de détection, de suivi et de classification des usagers de la route, les erreurs sur la mesure de la vitesse, les erreurs sur la mesure de la distance de dépassement, les erreurs de détection des dépassements, et les erreurs sur les classes de distance de dépassement.

4.2.1 Détection, suivi et classification des usagers de la route

Les algorithmes de détection, de suivi et de classification comportent quelques limitations. Ces limitations affectent les résultats globaux du système. Dans cette étude, il est important que l'outil

soit en mesure de différencier une voiture d'un cycliste. La performance de la classification a un effet direct sur la performance de la détection des dépassements. Sur un échantillon de 381 objets, ce qui représente une heure de données, l'erreur de classification est de 17,8 %. Les deux principales causes d'erreurs de classification des usagers de la route sont illustrées à la figure 4.12.



Figure 4.12 : Causes principales des erreurs de classification en direction ouest (image de gauche) et en direction est (image de droite)

En direction ouest, les conditions climatiques sont une problématique lors de la classification des usagers. En règle générale, les systèmes de détection et suivi des objets sont sensibles aux variations de luminosité en raison du contraste entre le fond et l'objet. Cette erreur se présente sous une des deux formes suivantes : la détection multiple ou l'absence de détection. Premièrement, la détection multiple signifie que le système a identifié plus d'un objet, mais en réalité, il y a seulement un objet. Ce phénomène est illustré à l'image de gauche de la figure 4.12. Également, en présence d'ombrage, l'outil vidéo peut confondre l'ombre comme étant un objet réel, si l'ombre est en mouvement. Deuxièmement, l'absence de détection signifie que le système n'a détecté aucun objet, ce qui est principalement dû au contraste foncé de l'objet, à l'éblouissement du soleil, à la grande distance séparant l'objet de la caméra ou aux occlusions. La mauvaise détection des objets affecte la classification, puisque l'algorithme tente d'identifier l'objet à partir d'une ombre ou d'un fragment de l'objet. En direction est, la cause principale d'erreur de classification est la présence de gros véhicules (ex. autobus, camions et remorques). Les véhicules volumineux sont problématiques puisqu'ils sont détectés par le système comme plusieurs objets. Dans le cas présenté à l'image de droite de la figure 4.12, l'autobus est considéré comme cinq objets, dont trois cyclistes et deux véhicules. D'autres défis de détection et suivi surviennent en présence de gros véhicules. L'occlusion causée par les véhicules volumineux empêche la détection et le suivi continu

des objets cachés. Également, le système a de la difficulté à dissocier les objets circulant à des vitesses similaires et qui sont à proximité l'un de l'autre.

4.2.2 Mesure de la vitesse

Ensuite, cette évaluation du système concerne les erreurs sur la mesure de vitesse pratiquée des conducteurs au niveau des tubes pneumatiques. Les vitesses des véhicules mesurées par l'outil sont comparées à celles collectées par les tubes pneumatiques. Les tubes pneumatiques ont été installés temporairement sur la chaussée avant la collecte vidéo. Le capteur pneumatique a recueilli des données de vitesse des véhicules à une position précise sur la route, tandis que le système vidéo a calculé plusieurs mesures de vitesse instantanée d'un véhicule lors de son passage devant la caméra. Afin de comparer ces deux mesures, la vitesse à l'intérieur d'une zone d'intérêt a été calculée à partir des données de l'outil vidéo (voir la figure 4.7). Cette mesure est la mesure automatique recueillie par l'outil et la mesure de référence est la vitesse collectée par les tubes pneumatiques. Il est important de mentionner qu'aucun capteur de mesure de vitesse n'est parfait, mais on fait ici l'hypothèse que la mesure la plus précise est celle des tubes pneumatiques. La figure 4.13 illustre la comparaison entre ces deux mesures de vitesse.

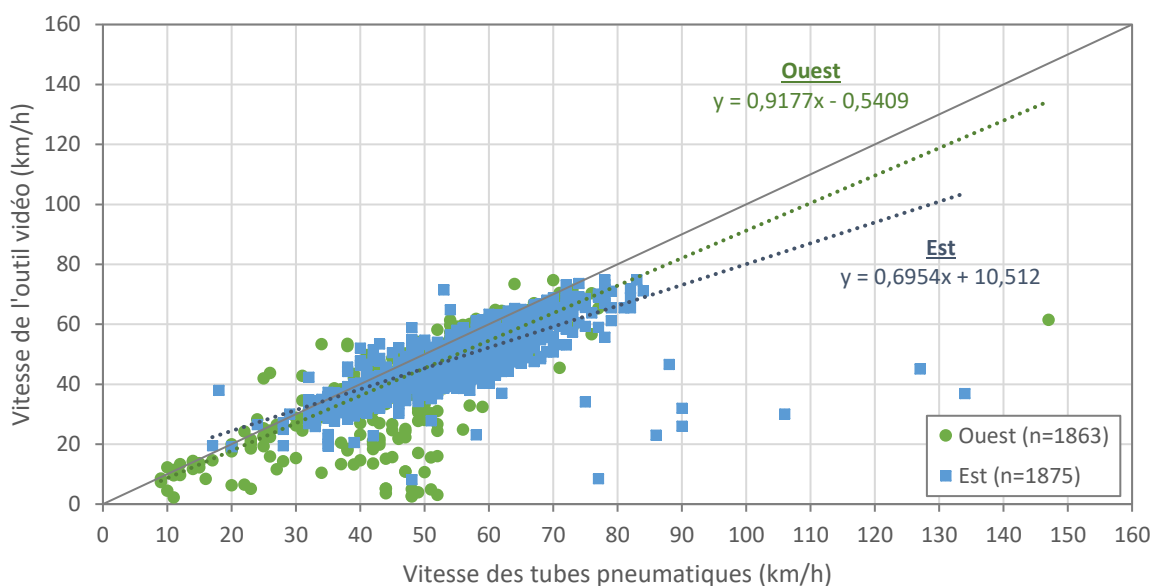


Figure 4.13 : Comparaison des mesures de vitesse de l'outil et des tubes pneumatiques

La diagonale représente la tendance souhaitée (s'il n'y avait pas d'erreur, tous les points seraient sur cette droite) et les points représentent les mesures de vitesse des véhicules pour les deux

directions. Selon le graphique, les tendances linéaires des mesures de vitesse sont sous la diagonale, ce qui signifie que les mesures de vitesse sont sous-estimées par l'outil vidéo. Plusieurs points atypiques éloignés de la diagonale sont observés pour des valeurs de vitesse réelle élevées. La limite de vitesse à ce site est de 50 km/h. Les vitesses réelles enregistrées par le capteur pneumatique de 80 km/h et plus semblent aberrantes. Pour sa part, l'outil vidéo n'a pas détecté de véhicules circulant à plus de 80 km/h. Ce constat remet en question la validité et la précision des mesures de vitesse des tubes pneumatiques. Les véhicules ayant une vitesse égale ou supérieure 80 km/h ont été exclus du calcul des erreurs, ainsi que les véhicules ayant une vitesse égale ou inférieure à 5 km/h. Les petites vitesses sont principalement observées par l'outil vidéo, ce qui est probablement dû à une erreur de classification ou de détection de l'utilisateur. Le tableau 4.1 présente les erreurs relative et absolue des mesures de vitesse des véhicules par l'outil.

Tableau 4.1 : Erreurs sur la mesure de la vitesse des véhicules (erreur relative, erreur absolue) par rapport aux tubes pneumatiques

Type d'erreur		Ouest (n=1853)	Est (n=1861)	2 directions (n=3714)
Moyenne	<i>Rel.</i>	13,33 %	13,39 %	13,36 %
	<i>Abs.</i>	(4,79 km/h)	(6,06 km/h)	(5,43 km/h)
Médiane	<i>Rel.</i>	8,61 %	10,51 %	9,41 %
	<i>Abs.</i>	(3,96 km/h)	(5,19 km/h)	(4,48 km/h)
85 ^e centile	<i>Rel.</i>	15,00 %	21,68 %	18,31 %
	<i>Abs.</i>	(6,63 km/h)	(9,97 km/h)	(8,49 km/h)

Dans les deux directions combinées, l'erreur relative moyenne est d'environ 17 %, ce qui représente une erreur de mesure de vitesse de 5,7 km/h. En moyenne, l'erreur est légèrement plus élevée en direction ouest, toutefois la médiane et le 85^e centile sont plus élevés en direction est. Dans 50 % des cas, l'erreur relative est de 9 % et moins, ce qui représente une erreur de 4,5 km/h et moins. Globalement, l'erreur sur la mesure de vitesse est élevée, toutefois, la validité de la mesure des vitesses à partir des tubes est remise en question. Également, l'erreur peut s'expliquer par le choix de la méthode de mesure de la vitesse de l'outil vidéo. La vitesse est calculée selon la distance parcourue et le temps dans la zone d'intérêt pour la position centre du véhicule. La problématique est que la position du centroïde de l'objet n'est pas fixe, elle est sujette à des variations d'une image à l'autre. La position centre est mesurée selon les points d'intérêt de l'objet

à l'instant étudié. Les points d'intérêt peuvent apparaître et disparaître durant la trajectoire de l'objet ce qui peut modifier le positionnement du centroïde sur l'objet. Ainsi, le temps passé à l'intérieur de la zone d'intérêt peut être faussé par ce déséquilibre de la position centre de l'objet. D'autres méthodes de mesure de la vitesse auraient pu être utilisées pour limiter les erreurs attribuables à la position centre de l'objet, telles que la dérivée des vecteurs de vitesse des points d'intérêt à l'intérieur de la zone ciblée.

4.2.3 Mesure de la distance de dépassement

Afin d'évaluer la fiabilité et la performance du système en ce qui a trait à la précision de la mesure de la distance de dépassement, une mesure de référence est nécessaire. Comme il a été expliqué précédemment, un dépassement se produit sur une courte durée de temps. Pour évaluer la distance de dépassement, une seule mesure est choisie pour représenter l'évènement. La mesure réelle est une mesure manuelle sur l'image vidéo à l'instant ciblée à partir du positionnement du point de l'objet le plus proche de la caméra, et ce, pour la voiture et le cycliste. La position la plus proche de la caméra est le devant gauche de l'objet en direction ouest, et le derrière droit de l'objet en direction est (voir la figure 4.9). À partir de la position de ces points, il est possible de mesurer une distance de dépassement qui, par la suite, est comparée à celle de l'outil. La figure 4.14 illustre la distance de dépassement automatique du système selon la distance de dépassement réelle.

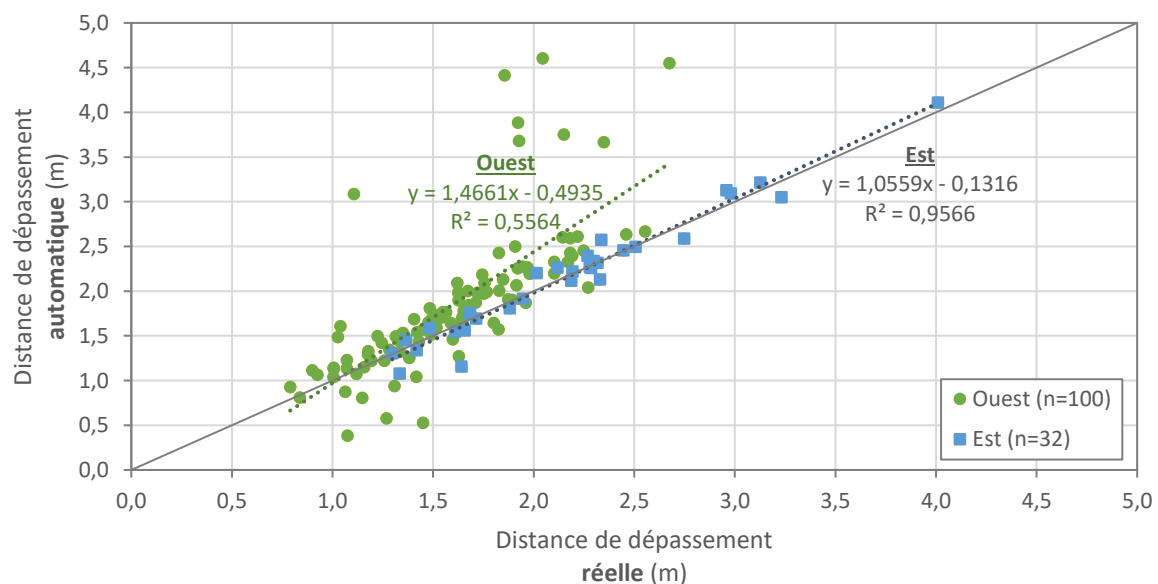


Figure 4.14 : Comparaison des distances de dépassement automatique et réelle

Chaque point sur la figure représente un des 132 dépassements évalués. Les points au-dessus de la diagonale sont des mesures surestimées par l'outil et les points au-dessous sont des mesures sous-estimées. Les tendances linéaires pour les deux directions sont au-dessus de la diagonale, ce qui signifie que les mesures de distance de dépassement ont été surévaluées par l'outil automatique. La tendance linéaire de la direction est donne un R^2 intéressant de 0,96 avec un coefficient très proche de 1, donc des erreurs assez faibles. Plusieurs points atypiques surestimés sont observés pour les dépassements en direction ouest. Il est à noter que la caméra a été installée en bordure de la chaussée du côté de la direction est, donc, la direction ouest est la direction la plus éloignée de la caméra. La direction ouest semble plus problématique dans l'évaluation automatique des distances de dépassement. Cette difficulté est principalement explicable par les zones cachées dans l'image caméra. Pour évaluer les distances de dépassement entre le véhicule et le cycliste, l'espace entre ces deux objets est important. Toutefois, cette zone est partiellement cachée par le véhicule pour la direction ouest, en raison de l'angle de la caméra. Ce phénomène est particulièrement problématique lorsque le véhicule cache le bas du corps du cycliste. Le système identifie des points d'intérêt du cycliste qui sont perceptibles par la caméra. Ainsi, la position du cycliste la plus proche de la caméra sera plus éloignée qu'elle l'est réellement. Cette erreur de positionnement du cycliste dans cette direction cause une amplification de la distance de dépassement entre le cycliste et le véhicule comme il est possible d'observer à la figure 4.11. Le tableau 4.2 présente les erreurs relative et absolue sur la mesure de la distance de dépassement.

Tableau 4.2 : Erreurs sur la mesure de la distance de dépassement (erreur relative, erreur absolue) par rapport à la mesure manuelle

Type d'erreur		Ouest (n=100)	Est (n=32)	2 directions (n=132)
Moyenne	<i>Rel.</i>	21,39 %	5,17 %	17,62 %
	<i>Abs.</i>	(0,35 m)	(0,10 m)	(0,29 m)
Médiane	<i>Rel.</i>	12,67 %	4,03 %	9,51 %
	<i>Abs.</i>	(0,19 m)	(0,08 m)	(0,16 m)
85° centile	<i>Rel.</i>	30,64 %	8,76 %	26,66 %
	<i>Abs.</i>	(0,46 m)	(0,19 m)	(0,41 m)

Pour les deux directions combinées, l'erreur relative moyenne est d'environ 18 %, ce qui représente une erreur de mesure de 29 cm. En direction ouest, l'erreur moyenne est de 21 % ce qui représente une erreur de mesure de 35 cm et en direction est, l'erreur moyenne est de 5 % ce qui représente une erreur de mesure de 10 cm. Comme il a été observé précédemment, la direction ouest possède une erreur plus grande qu'en direction est. Le pourcentage d'erreur est amplifié en raison des points atypiques en direction ouest, ce qui peut s'observer à partir de l'erreur médiane. En effet, l'erreur médiane en direction ouest est bien plus faible que l'erreur moyenne, soit presque la moitié de l'erreur moyenne. Dans 50 % des situations de dépassement, l'erreur est de 16 cm et moins, ce qui est une distance relativement courte selon l'utilisation souhaitée.

4.2.4 Classes de distance de dépassement

Les classes sont des intervalles de valeur de distance de dépassement. Au total, quatre classes ont été utilisées pour présenter les dépassements : moins de 1 m, 1 à 1,5 m, 1,5 à 2 m et 2 m et plus. Les erreurs sur la mesure de la distance de dépassement causent des erreurs de classification. Selon la route, le critère de la distance sécuritaire entre le cycliste et la voiture est différent. Pour des routes où la limite est de 50 km/h et moins, comme le cas présent, la distance prescrite est de 1 m. Pour les routes ayant une limite de vitesse de plus de 50 km/h, la distance prescrite est de 1,5 m. En dessous de la distance prescrite, les dépassements sont considérés comme dangereux. Cette classification permet de regrouper les dépassements selon le niveau de sécurité, de dangereux à très sécuritaire. Les dépassements ont été catégorisés selon la distance de dépassement mesurée par l'outil et selon la distance mesurée manuellement. La figure 4.15 présente la matrice de confusion et la comparaison de la classification des dépassements entre les deux méthodes de mesures.

Dans la matrice de confusion, la diagonale représente les dépassements qui ont été bien classifiés et les autres cases représentent les dépassements mal classifiés. Ainsi, 71,2 % des dépassements sont bien classifiés par le système automatique. Réellement, quatre dépassements sont considérés comme dangereux comparativement à huit dépassements identifiés par le système automatique, ce qui représente 3 % des dépassements évalués. Sur le graphique de droite, le pourcentage de dépassement entre 1 et 2 m est sous-estimé par le système. Le système automatique a surévalué le nombre de dépassements de plus de 2 m.

		Automatique				
		< 1	1-1,5	1,5-2	> 2	Total
Réelle	< 1	2	2			4
	1-1,5	6	26	11	1	44
	1,5-2		3	30	15	48
	> 2				36	36
	Total	8	31	41	52	132

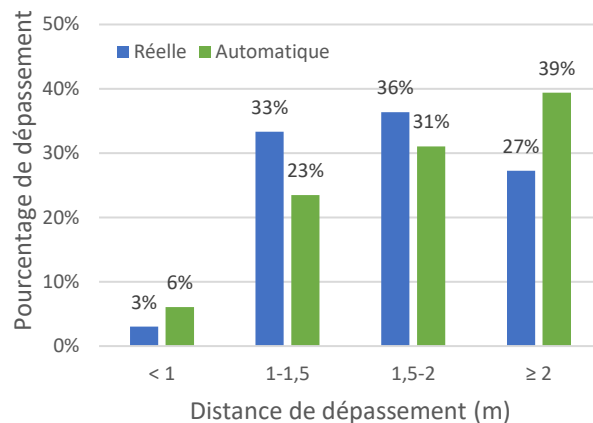


Figure 4.15 : Matrice de confusion (à gauche) et comparaison des distances de dépassement (à droite) pour les deux directions combinées

4.2.5 Détection des dépassements

La dernière évaluation du système concerne les erreurs sur la détection des dépassements des cyclistes. Les dépassements évalués dans les analyses sont les dépassements qui ont une correspondance entre le système automatique et la réalité. En d'autres mots, ces 132 dépassements évalués sont des dépassements réels qui ont été détectés par le système. Au total, le système a détecté 155 vrais dépassements, toutefois 23 d'entre eux n'ont pas été évalués puisque la position du cycliste lors du dépassement n'était pas visible pour la mesure manuelle. Le système automatique a également détecté des fausses alertes de dépassement. Ces fausses alertes représentent 35 % des détections du système, soit 84 dépassements. Les principales erreurs de détection de dépassement sont dues aux erreurs de classification. Comme il a été vu précédemment, la détection multiple des véhicules volumineux engendre une classification multiple de l'objet (voir la figure 4.12). La fausse détection d'un cycliste renvoie au système de l'information erronée. L'algorithme tente d'identifier un ou plusieurs véhicules qui sont dans la même direction et qui ont dépassé le cycliste. Dans le cas de véhicules volumineux, la détection de plusieurs cyclistes et véhicules est récurrente. En plus des fausses détections, le système omet de détecter des vrais dépassements. Au total, 256 dépassements ont été repérés manuellement et 39 % d'entre eux n'ont pas été identifiés par le système. Les deux principales raisons pour expliquer ces lacunes sont les occlusions produites par les véhicules et les erreurs de regroupement des points d'intérêt pour identifier plus d'un objet (ex. deux usagers distincts sont suivis comme un seul objet). Tout d'abord,

le passage d'un véhicule produit une zone dissimulée de la caméra. Cette zone est inconnue du système, ainsi, l'occlusion totale ou partielle d'un cycliste peut causer des détections manquées. Ensuite, lorsque deux objets et plus se suivent de près et qu'ils ont des vitesses similaires, les points d'intérêt des objets peuvent être groupés ensemble comme un seul usager. À l'occasion, l'outil vidéo ne parvient pas à dissocier ces objets et les considère comme un seul objet. Dans les situations où le cycliste et l'automobiliste sont confondus, le dépassement ne peut pas être identifié par l'algorithme.

4.3 Résultats et analyse des données

L'ensemble de données est composé de 24 vidéos d'une vingtaine de minutes chacun, pour un total de 467 minutes d'enregistrement. L'enregistrement a eu lieu un dimanche au mois d'octobre 2018 entre 9h30 et 17h. Les données proviennent d'un seul site et d'une seule installation, donc l'angle de la caméra reste inchangé. La résolution de la caméra est de 1280 x 720 pixels et la fréquence d'image est de 29,97 IPS. La collecte a été effectuée sur une route avec un débit élevé de cyclistes, soit la rue Camillien-Houde située sur le Mont-Royal à Montréal. Cette route en montagne est très populaire auprès des amateurs de plein air et de vélo pour ses beaux paysages et pour l'entraînement intensif qu'elle leur procure. La caméra a été installée dans le bas de la montagne du côté est. Durant les 7h30 de collecte, 5073 véhicules et cyclistes, combinés, ont été comptés par les tubes pneumatiques installés sur la chaussée à la vue de la caméra. La limite de vitesse est de 50 km/h.

Deux types de mesures ont été extraits du système : les vitesses avant, après et pendant le dépassement de cyclistes pour les véhicules impliqués dans l'évènement, ainsi que les distances de dépassement.

4.3.1 Vitesse de dépassement

Tout d'abord, les vitesses des véhicules avant, pendant et après le dépassement d'un cycliste sont étudiées afin d'évaluer si les conducteurs ont tendance à diminuer leur vitesse pratiquée en présence de cyclistes. Pour ce faire, la moyenne des vitesses instantanées est calculée pour les périodes avant le dépassement, après le dépassement et pendant le dépassement, et ce, durant le passage devant la caméra. La durée minimale de la période avant et de la période après est de 2 images, ce qui représente 0,07 s. En dessous de cette durée minimale, la vitesse moyenne pour la période concernée n'est pas retenue dans les analyses. Toutes les voitures ciblées ont effectué un

dépassement d'un cycliste devant la caméra. Certains de ces véhicules ne possèdent pas de vitesse moyenne avant ou après le dépassement, parce qu'au moment ciblé, ils sont à l'extérieur de la zone de couverture de la caméra ou que la durée est trop faible. Le tableau 4.3 présente les vitesses moyennes et les écarts-types avant, pendant et après le dépassement, ainsi que l'effet sur les vitesses.

Tableau 4.3 : Vitesse moyenne et écart-type des véhicules (entre parenthèses), avant, pendant et après le dépassement des cyclistes, ainsi que l'effet sur les vitesses

Moment	Ouest (montée)	Est (descente)	2 directions
<i>Vitesse moyenne et écart-type</i>			
Avant le dépassement (km/h)	45,75 (± 7,50)	50,83 (± 12,89)	46,95 (± 9,27)
Pendant le dépassement (km/h)	49,35 (± 8,65)	47,34 (± 11,73)	48,86 (± 9,48)
Après le dépassement (km/h)	45,52 (± 10,12)	41,69 (± 10,78)	44,56 (± 10,38)
<i>Effet sur la vitesse moyenne et différence significative à 95 %</i>			
Pendant – Avant le dépassement (km/h)	↑ 3,60 (Oui)	↓ 3,49 (Non)	↑ 1,91 (Non)
Après – Pendant le dépassement (km/h)	↓ 3,83 (Oui)	↓ 5,66 (Oui)	↓ 4,30 (Oui)

Dans les deux directions, les vitesses moyennes avant, pendant et après sont relativement similaires. Avant les dépassements, la vitesse moyenne est de 45,75 km/h en direction ouest, et de 50,83 km/h en direction est. La vitesse moyenne pendant les dépassements est de 49,35 km/h en direction ouest, ce qui représente une hausse significative de 3,59 km/h. En direction est, la vitesse moyenne pendant le dépassement est de 47,34 km/h, ce qui représente une baisse non significative de 3,49 km/h. Pour ce qui est des vitesses après le dépassement, celles-ci sont plus faibles que durant les dépassements de 3,83 km/h en direction ouest et de 5,66 km/h en direction est. Ces résultats sont à l'encontre du comportement souhaité. En présence de cyclistes, les conducteurs

devraient réduire leur vitesse pour la sécurité de ces usagers plus vulnérables. Trois raisons peuvent tenter d'expliquer ces résultats. Premièrement, la route étudiée possède des accotements larges d'environ 2,5 mètres de chaque côté. La présence d'accotement affecte probablement les distances de dépassement et des vitesses pratiquées par les conducteurs en présence de cyclistes, puisque les cyclistes ont plus d'espace, non partagé avec les véhicules, pour circuler. Cependant, il s'agit d'hypothèses qui n'ont pas été vérifiées sur le terrain. Deuxièmement, la zone couverte par la caméra limite l'étude des vitesses avant et après le dépassement aux vitesses instantanées observables par la caméra. Pour une meilleure observation des effets de la présence de cyclistes sur les vitesses pratiquées, il serait préférable d'étudier les vitesses plus en amont et en aval de l'endroit du dépassement pour laisser le temps au conducteur d'adapter sa vitesse aux conditions de la route et à la présence du cycliste. Troisièmement, ces résultats pourraient s'expliquer par le fait que les conducteurs appliquent le même comportement de dépassement avec les cyclistes qu'avec les automobilistes, c'est-à-dire qu'ils accélèrent pour dépasser afin d'être le moins longtemps en situation de dépassement, souvent dans la voie du trafic opposé. Ce comportement d'accélération au moment du dépassement peut sembler plus sécuritaire lorsque le conducteur empiète sur la voie en direction opposé, malgré le règlement qui stipule que le conducteur doit réduire sa vitesse lors d'un dépassement. Ainsi, les conducteurs seraient en infraction selon le Code de la sécurité routière. Maintenant, une question peut être soulevée en ce qui concerne la vitesse acceptable lors d'un dépassement. Par exemple, on peut se demander si un conducteur circulant à 30 km/h dans une zone de 50 km/h doit réduire sa vitesse lorsqu'il veut dépasser un cycliste. Sa vitesse semble déjà sécuritaire.

Par ailleurs, une variable individuelle par dépassement, à savoir, les différences de vitesse de chaque conducteur (pendant-avant et après-pendant) est testée pour savoir si ces différences sont significativement différentes de 0. Une différence significative de 0 voudrait dire que le conducteur ne modifie pas sa vitesse avant, pendant et après le dépassement, qu'elle reste stable. La figure 4.16 illustre ces différentiels des vitesses moyennes selon la période et la direction du véhicule.

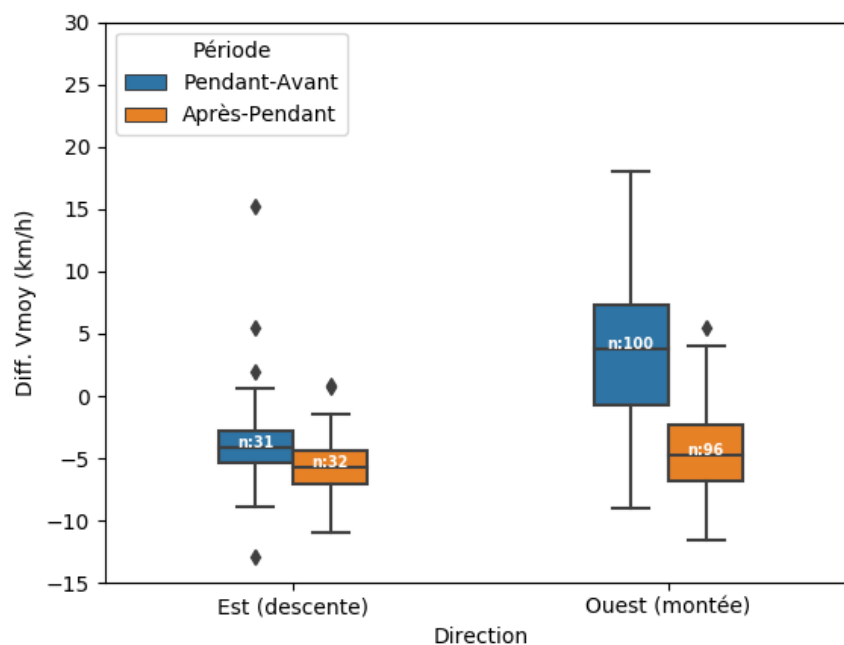


Figure 4.16 : Différentiel des vitesses moyennes pratiquées des conducteurs pendant-avant et après-pendant le dépassement

En direction est, soit la descente de la montagne, on observe une diminution des vitesses pratiquées moyenne individuelle de 3,4 km/h entre avant et pendant le dépassement. Puis, les vitesses pratiquées moyennes continuent de diminuer d'en moyenne de 5,7 km/h entre après et pendant le dépassement. Ces diminutions des vitesses sont principalement dues à la pente descendante de la route. En direction ouest, soit la montée de la montagne, on observe une augmentation moyenne de 3,60 km/h entre avant et pendant le dépassement, puis une diminution moyenne de 3,96 km/h des vitesses pratiquées individuelles entre après et pendant. Les hypothèses nulles, comme quoi la différence dans les vitesses moyennes est égale à 0, sont rejetées à un niveau de confiance de 95 %. Ainsi, les différentiels dans les vitesses moyennes des conducteurs entre les périodes, pendant-avant et après-pendant, sont significativement différents de 0 km/h.

Pour tenter de mieux comprendre les vitesses pratiquées des conducteurs lors des dépassements et à l'extérieur des instants de dépassements, la figure 4.17 présente une évaluation spatiale des vitesses.

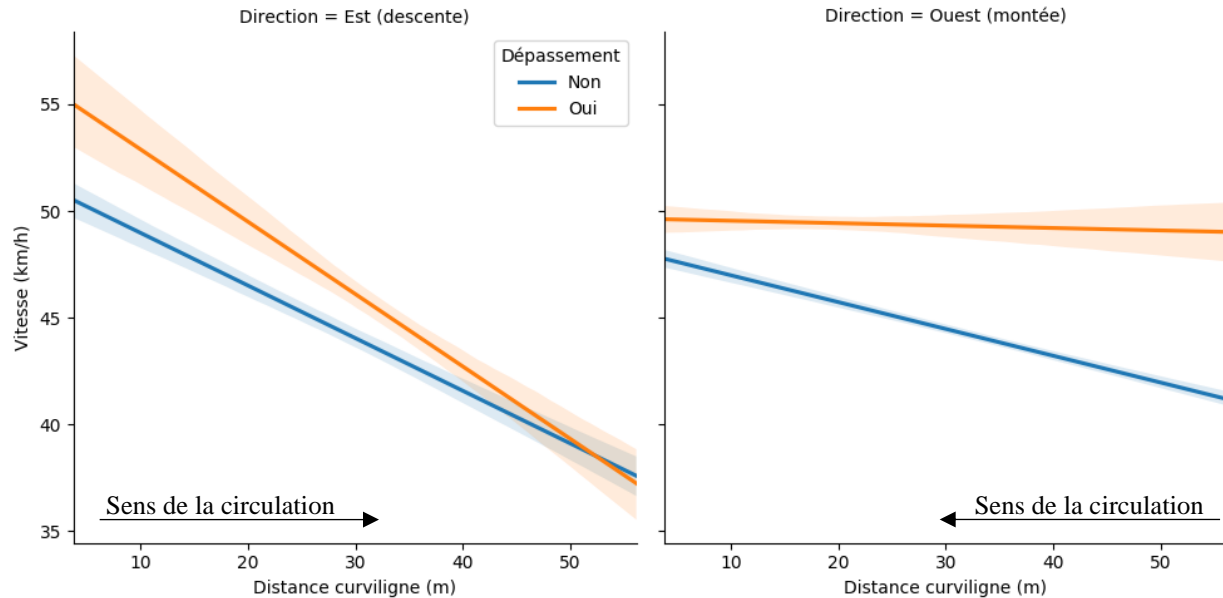


Figure 4.17 : Évolution spatiale des vitesses des conducteurs pendant le dépassement et avant/après le dépassement

L'axe des x est la distance curviligne, soit la position du véhicule projetée dans un système de coordonnées curvilignes. Ces graphiques permettent d'observer l'évolution des vitesses pratiquées instantanées des conducteurs le long du segment routier (selon un modèle linéaire à un intervalle de confiance de 95 %), et ce, pour les deux directions. La zone de couleur entourant une ligne de régression linéaire représente la dispersion de l'échantillon pour les deux variables, la distance curviligne (x) et la vitesse (y). En direction est, les vitesses pratiquées diminuent le long du segment que ce soit durant la période de dépassement ou à l'extérieur de la période de dépassement. Cette figure illustre bien l'effet de la pente négative sur les vitesses. Les conducteurs ont tendance à décélérer en descendant la côte. Étonnamment, les vitesses sont légèrement plus élevées lors d'un dépassement d'un cycliste. En direction ouest, les vitesses pratiquées des conducteurs semblent assez stables lors des dépassements des cyclistes le long de la route. Lorsque les conducteurs ne dépassent pas un cycliste, les vitesses pratiquées augmentent graduellement avec la montée de la montagne. Les vitesses sont aussi plus élevées lors des dépassements des cyclistes.

4.3.2 Distance de dépassement

Comme il a été mentionné précédemment, un dépassement se produit sur une courte durée. Il est possible de mesurer une distance de dépassement dans chaque image vidéo représentant

l'évènement. Ainsi, pour un dépassement, il y a généralement plus d'une distance mesurée par le système. La distance de dépassement retenue pour représenter l'évènement est la distance mesurée à la mi-temps. Par exemple, pour un dépassement qui a duré 15 images (0,5 s), la distance retenue est celle qui s'est produite à la huitième image. Si la distance mesurée à la mi-temps est plus élevée ou moins élevée de 30 cm comparativement à la distance de l'image d'avant ou celle d'après, la distance de l'image d'après est retenue. Cette condition permet de cibler une distance de dépassement représentatif de tout l'évènement sans utiliser une moyenne. L'utilisation de la moyenne est évitée dans le calcul de la distance de dépassement, puisqu'une seule erreur de positionnement des points d'intérêt de l'objet peut entraîner des valeurs moyennes de distance erronées. Par exemple, la figure 4.11 illustre bien une erreur de positionnement de la voiture à l'image 3695. Somme toute, le choix de la distance de dépassement retenue dépend des besoins et l'objectif de l'analyse. Un policier aurait plutôt tendance à utiliser la valeur minimale de la distance de dépassement. Dans notre cas d'étude, la valeur à la mi-temps est retenue. Le tableau 4.4 présente le pourcentage de dépassement selon la distance entre le cycliste et la voiture ainsi que la direction.

Tableau 4.4 : Répartition des dépassements selon la distance de dépassement et la direction

Distance de dépassement	Ouest (n=100)	Est (n=32)	2 directions (n=132)
< 1,0 m	8,0 %	0,0 %	6,0 %
1,0 – 1,5 m	26,0 %	15,6 %	23,5 %
1,5 – 2,0 m	34,0 %	21,9 %	31,1 %
≥ 2,0 m	32,0 %	62,5 %	39,4 %

Selon le tableau, 6 % des dépassements sont considérés comme dangereux. Un dépassement est considéré dangereux, pour ce site, lorsque la distance est de moins d'un mètre. Cette condition provient du Code de la sécurité routière pour les routes ayant une limite de vitesse de 50 km/h et moins. Globalement, 23 % des dépassements sont entre 1,0 et 1,5 m, 31 % sont entre 1,5 et 2,0 m et 39 % sont plus de 2,0 m. Il est également, possible de constater que tous les dépassements qui sont considérés comme dangereux surviennent en direction ouest, soit la direction en ascension. En direction est, aucun dépassement enregistré n'est dangereux et plus de 60 % de ces dépassements sont très sécuritaires, soit de plus de 2,0 m. Il est important de mentionner qu'il y a trois fois plus de dépassement observé en direction ouest. La direction ouest est la direction la plus éloignée de la caméra.

4.4 Synthèse des résultats

L'objectif principal de cette section était d'évaluer la sécurité des dépassements des cyclistes afin de mieux comprendre le comportement des conducteurs en présence de ces usagers vulnérables. Pour ce faire, un outil d'automatisation pour mesurer les vitesses pratiquées et les distances de dépassement a été développé à partir d'un système de traitement d'images vidéo. Cet outil a été implanté dans *Traffic Intelligence*, qui permet la détection, le suivi et la classification des usagers de la route. Les deux algorithmes implantés dans ce système permettent d'identifier les dépassements, de mesurer la distance entre le cycliste et le véhicule, d'évaluer le niveau de sécurité et de mesurer les vitesses pratiquées des conducteurs avant, pendant et après l'évènement.

Vitesses pratiquées

L'algorithme de mesure des vitesses pratiquées des automobilistes permet, d'une part, de comparer la vitesse obtenue par l'outil à celle obtenue par une méthode de collecte externe et, d'autre part, d'évaluer le comportement de vitesse des conducteurs avant, pendant et après le dépassement. Tout d'abord, les vitesses des véhicules sont évaluées avant, pendant et après le dépassement d'un cycliste pour vérifier si la présence d'un cycliste affecte le comportement du conducteur. Selon les résultats, une hausse significative, d'en moyenne de 4 km/h, est observée après le dépassement d'un cycliste comparativement au moment de l'évènement. Pour ce qui est de la période avant le dépassement, il n'y a pas de relation significative sur la moyenne pour les deux directions combinées. Dans l'ensemble, le comportement des conducteurs est contraire à celui attendu, puisqu'on s'attendrait, normalement, à une diminution des vitesses pratiquées des automobilistes en présence de cyclistes. Ce comportement non sécuritaire pourrait être expliqué par la présence d'accotement large.

Ensuite, en comparant les vitesses pratiquées calculées par le système aux vitesses obtenues par les tubes pneumatiques, on observe une sous-estimation générale de ces valeurs. Globalement, le système automatique sous-estime les vitesses des conducteurs de 5,7 km/h, ce qui représente une erreur de 17 %. Cette erreur est principalement due à l'instabilité de la position centre de l'objet.

Distances de dépassement

L'algorithme de mesure des distances de dépassement peut être expliqué en quatre étapes. Tout d'abord, l'algorithme recherche tous les usagers qui sont classifiés comme des cyclistes par le

système. Puis, il identifie tous les véhicules qui sont dans la même direction que le cycliste et il les filtre selon l'intervalle de passage commun devant la caméra. Ensuite, l'algorithme identifie les véhicules, qui effectuent un dépassement, à partir de la position des objets dans le temps. Finalement, les distances entre les deux objets sont mesurées pour les dépassements détectés avec l'utilisation d'hypothèses de largeur des usagers.

Les dépassements identifiés automatiquement sont comparés manuellement afin d'évaluer la performance de l'outil. Au total, 65 % des détections du système automatique sont des bonnes alertes et 61 % des dépassements réels ont été détectés. Le système automatique a identifié 6 % des dépassements comme étant dangereux. Un dépassement est jugé dangereux lorsque la distance entre le cycliste et la voiture est inférieure à un mètre. Toutefois, le pourcentage de dépassements dangereux mesurés manuellement diminue à 3 %. Tous les dépassements dangereux surviennent en direction ouest, soit la direction la plus éloignée de la caméra et la direction en ascension du Mont-Royal. En direction est, plus de 60 % des dépassements sont très sécuritaires, avec une distance de plus de 2 m. En plus du pourcentage élevé de dépassements sécuritaires, la direction est possède la plus faible erreur sur la mesure de distance, soit une erreur relative moyenne de 5 % et une erreur de mesure de 10 cm. Pour sa part, la direction ouest possède une erreur plus élevée de l'ordre de 21 % et 35 cm d'erreur moyenne. La faiblesse de mesure est principalement attribuable aux occlusions des usagers entre eux.

Somme toute, la méthode proposée souffre de plusieurs problèmes qui limitent sa performance. La performance nécessaire dépend de l'application et des objectifs de l'étude. L'outil proposé comporte plusieurs erreurs qui appauvrissent son efficacité et sa fiabilité. Les cinq principales faiblesses sont l'utilisation d'hypothèses de largeur d'objet, les occlusions partielles, la classification déficiente des objets, les problèmes de projection des points et le mauvais regroupement des points d'intérêt.

CHAPITRE 5 CONCLUSION

La vitesse est une des principales causes de collisions de la route. Malgré l'imposition de limites de vitesse, il n'est pas rare que les conducteurs excèdent ces limites. Ce comportement non désiré est difficilement prédictible puisque de nombreux facteurs affectent le choix de la vitesse adoptée par les conducteurs. Afin de mieux expliquer le comportement des automobilistes, ce projet visait à évaluer les vitesses et le comportement des conducteurs dans différentes conditions qui peuvent être problématiques au niveau de la sécurité routière. Le premier objectif était d'évaluer le comportement selon certaines caractéristiques de la route et de l'environnement routier à des sites ayant subi une modification de la limite de vitesse. Pour ce faire, une évaluation des vitesses pratiquées avant et après des modifications a été faite et des modèles statistiques ont été développés afin de déterminer si un changement de comportement avait eu lieu et de prédire le comportement des conducteurs selon différentes caractéristiques de la route. Le deuxième objectif était d'évaluer le comportement des conducteurs lors de dépassements avec un cycliste et, par le fait même, d'évaluer la sécurité de ces manœuvres. Un outil d'automatisation a été développé à partir d'un système de vision par ordinateur pour identifier les situations de dépassements, évaluer les vitesses pratiquées et mesurer les distances entre le cycliste et le véhicule.

Diagnostic des comportements

Afin d'évaluer le comportement de vitesses des conducteurs, quatre indicateurs ont été utilisés : la vitesse moyenne pratiquée, le 85^e centile des vitesses pratiquées, le pourcentage de contrevenants et le ratio des vitesses. La première analyse tentait d'identifier la présence ou non d'une tendance temporelle du comportement des conducteurs. Selon les résultats, aucune variation importante dans le temps n'a été observée pour les sites n'ayant subi aucun changement aux limites de vitesse. Pour les sites ayant eu une modification, des tendances non significatives ont été observées. Selon ces tendances, le ratio des vitesses diminue légèrement dans le temps avant la modification et il augmente légèrement après la modification. Également, le ratio des vitesses est plus élevé après le changement comparativement à avant, ce qui veut dire que l'excès des vitesses affichées est plus important après les réductions de limite de vitesse. En général, les limites de vitesse sont moins bien respectées après le changement. Il est à noter que 84 % des sites cas ont subi une diminution des limites de vitesse.

Ensuite, il a été trouvé que le différentiel des vitesses moyennes pratiquées n'est pas proportionnel au différentiel des vitesses affichées. En d'autres mots, une diminution de 10 km/h de la limite de vitesse n'entraîne pas systématiquement une diminution des 10 km/h des vitesses moyennes pratiquées. Selon l'étude, une diminution de 10 km/h des vitesses affichées entraîne une diminution de 2,5 km/h des vitesses moyennes pratiquées et une diminution de 3,2 km/h des 85^e centiles des vitesses pratiquées. Pour sa part, le différentiel du pourcentage de contrevenants tend à augmenter avec le différentiel des vitesses affichées. Ainsi, une diminution de 10 km/h de la limite entraîne une augmentation de 25,2 points de % des contrevenants, ce qui est cohérent avec la faible diminution du différentiel des vitesses pratiquées. Selon les analyses, plus la diminution des limites est grande, plus le différentiel du pourcentage de contrevenants est élevé et, inversement, plus la diminution des limites est petite, plus le différentiel du pourcentage de contrevenants est faible. Une diminution de la limite de 20 km/h entraîne une diminution de 4,3 km/h des vitesses moyennes pratiquées, une diminution de 3,8 km/h des 85^e centiles des vitesses pratiquées et une augmentation de 45,1 points de % des contrevenants.

Tout comme les diminutions des vitesses affichées, les augmentations ne sont pas accompagnées systématiquement d'une augmentation proportionnelle des vitesses pratiquées. Une augmentation des limites de vitesse de 10 km/h entraîne une faible augmentation des vitesses moyennes pratiquées de 0,3 km/h et une diminution de 22,0 points de % des délinquants. Pour ce qui est des contrevenants, le même phénomène, que pour les diminutions des limites, est observé, c'est-à-dire qu'une augmentation importante des limites de vitesse résulte en une diminution importante de la proportion d'excès. Une augmentation de la limite de 20 km/h résulte d'une diminution de 25,7 points de % des contrevenants, en plus, de subir une petite augmentation de 6,5 km/h des vitesses moyennes pratiquées et une augmentation de 3,3 km/h des 85^e centiles des vitesses pratiquées.

Des modèles statistiques ont été développés afin de prédire le comportement des conducteurs. Les modèles ont tenté de prédire la vitesse pratiquée moyenne après le changement, le différentiel du ratio des vitesses, le ratio des vitesses et le pourcentage de contrevenants à partir de certaines caractéristiques de la route et du site. Selon les résultats, les conducteurs ont tendance à réduire leur vitesse pratiquée après le changement de 8 km/h avec la présence d'un terre-plein latéral. Également, selon les modèles, la présence de ce terre-plein diminue de 36 points de % la proportion de contrevenants en plus de réduire le ratio des vitesses. Inversement, la présence de marquage

pour une zone de dépassement augmente de 14 points de % le pourcentage de contrevenants et de 0,06 le ratio des vitesses. Ainsi, un effet de rétrécissement des voies de circulation semble affecter positivement le choix des vitesses pratiquées. En revanche, lorsque les conducteurs ont plus d'espace pour circuler, par exemple dans une zone de dépassement, ils ont tendance à conduire plus rapidement.

En présence de cyclistes, on n'observe pas de diminution significative des vitesses pratiquées des conducteurs. Au contraire, de faibles augmentations des vitesses, de l'ordre de 4 km/h, sont observées comparativement à la période après le dépassement pour les deux directions. Cependant, la petite zone couverte par la caméra limite l'interprétation des vitesses pratiquées avant et après le dépassement aux vitesses mesurées par le système. Pour ce qui est des distances de dépassement, la majorité des conducteurs respectent la réglementation, qui exige une distance minimale d'un mètre pour une route ayant une limite de vitesse de 50 km/h et moins. Le système a détecté 6 % des dépassements évalués comme étant dangereux, soit une distance entre le cycliste et la voiture de moins d'un mètre. Toutefois, lorsque les dépassements du système sont comparés à une méthode manuelle, on constate que ce pourcentage diminue à 3 %. Globalement, le système surestime les distances de dépassement. Somme toute, plus de 90 % des conducteurs ont adopté un comportement sécuritaire lors du dépassement d'un cycliste.

Limites de la recherche

Plusieurs facteurs affectant le comportement des conducteurs ne sont pas abordés, tels que les caractéristiques des conducteurs et du véhicule, etc. L'étude se consacre uniquement aux limites de vitesse, à certaines caractéristiques géométriques de la route, à certaines caractéristiques de l'environnement routier, ainsi qu'aux dépassements de cyclistes en route partagée. Évidemment, ces facteurs étudiés ne permettent pas de prédire parfaitement le comportement des conducteurs, puisque plusieurs éléments ne sont pas observés. Également, l'étude statistique ne permet pas de tirer des conclusions en termes d'effets. On observe un comportement général qui ne peut pas être vérifié pour chaque site individuel. Les résultats obtenus proviennent des tendances observées pour des sites ayant des caractéristiques similaires.

Ensuite, le système de vision par ordinateur pour la détection, le suivi et la classification des usagers comporte plusieurs limitations, qui restreignent la fiabilité et la performance de l'outil. L'application de détection et suivi des usagers de *Traffic Intelligence* n'est pas parfaite. Plusieurs

types d'erreurs peuvent survenir et leur impact sur le système peut varier d'une utilisation à l'autre. Ces erreurs ont un impact sur les résultats, principalement, sur le diagnostic de sécurité des dépassements des cyclistes. Le système est, particulièrement, peu performant en présence de véhicules larges, comme les camions et les autobus. D'une part, ces véhicules volumineux créent de l'obstruction, ce qui produit une perte d'information des usagers en arrière-plan et d'une autre part, l'algorithme de détection considère, fréquemment, ces véhicules comme plusieurs usagers ou véhicules. En plus de considérer ces véhicules comme plusieurs usagers, l'algorithme de classification a des faiblesses, ce qui cause des erreurs dans la classe d'utilisateur de la route. Cette erreur est récurrente lors de la détection multiple des véhicules larges. Le système est, également, sensible aux mauvaises conditions de visibilité telles que l'éblouissement du soleil et la noirceur. De plus, il est sensible aux objets qui sont rapprochés et qui ont un mouvement similaire, ce qui peut causer des erreurs de regroupement des points d'intérêt. Ensuite, la projection des coordonnées de l'image vidéo en 2D dans l'espace réel en 3D est problématique pour les points d'intérêt surélevés et éloignés.

Par ailleurs, l'outil d'automatisation pour l'évaluation de la sécurité des dépassements développé possède quelques faiblesses dus aux hypothèses et aux choix des méthodes utilisées. Les hypothèses sur les largeurs des objets sont une limitation importante de l'outil. Ces hypothèses sont exploitées dans le but d'évaluer la distance entre le cycliste et la voiture au moment du dépassement. Ces hypothèses sont nécessaires en raison de la mauvaise projection des points d'intérêt des objets qui sont au-dessus du sol et éloignés de la caméra. Ensuite, la méthode comparative des mesures des vitesses comporte quelques lacunes, dont l'utilisation des tubes pneumatiques comme étant la mesure de référence, puisqu'elle apporte une source d'incertitude non-contrôlée.

Perspectives

L'évaluation du comportement des conducteurs face à un changement de limite de vitesse et aux caractéristiques de la route a été faite à partir d'un petit échantillon de sites, soit 76 sites cas et 43 sites témoins. Parmi les sites cas, 84 % ont subi une diminution des limites de vitesse et près de 90 % de ceux-ci ont vu leur limite de vitesse diminuer de 10 ou 20 km/h. Pour les prochaines recherches, il serait intéressant d'avoir un plus large échantillon de sites, particulièrement, des sites ayant subi une augmentation des limites, afin de mieux observer le comportement des conducteurs

dans ce cas. En plus d'augmenter le nombre de sites, il serait intéressant d'évaluer d'autres caractéristiques de la route à plus grande échelle, telles que les largeurs de voie et d'accotement, la densité d'accès et le dégagement latéral. Ces caractéristiques ont été étudiées dans cette recherche sur un petit échantillon de 16 sites en raison de la logistique requise pour couvrir chacun des sites (ex. se déplacer sur le site et prendre les mesures). Selon cette évaluation descriptive, la largeur de voie serait associée au ratio des vitesses, ce qui veut dire que plus la voie est large, moins la limite de vitesse est respectée, toutefois en raison du petit échantillon cette tendance observée n'est pas significative. De plus, une relation intéressante entre le dégagement latéral et le ratio des vitesses pour les sites ayant un dégagement plus petit que 150 mètres est observée. Selon cette relation, les conducteurs ont plus tendance à excéder les limites de vitesse lorsque le dégagement visuel latéral est plus large. Toutefois, en raison du faible échantillonnage, il n'est pas possible d'interpréter avec certitude ces observations et de poser des conclusions.

Également, l'étude s'est concentrée uniquement sur les journées de semaine entre 9h et 16h. Il est possible qu'il y ait un effet temporel du jour et de l'heure de la collecte sur les comportements. Il serait intéressant de pousser l'étude afin de prédire le comportement des conducteurs dans le temps à partir de paramètres temporels, tels que l'année, le mois, le jour, l'heure, la saison, les jours fériés, etc. Dans le même ordre d'idée, une future recherche pourrait tenter d'expliquer le comportement des conducteurs à partir de paramètres spatiaux, tels que la localisation de la route, la ville, la région géographique, etc. Une étude spatiale peut être intéressante pour cibler les zones géographiques plus problématiques au niveau des excès des limites de vitesse et ainsi ajuster les interventions de prévention.

Ensuite, le système de collecte et de traitement de données vidéo n'est pas adapté pour être utilisé en temps réel. Le système pourrait être optimisé afin de permettre l'analyse quasi instantanée des vitesses pratiquées et des distances de dépassement, ce qui pourrait être avantageux pour le contrôle de la réglementation. De plus, les algorithmes de détection, de suivi et de classification doivent être continuellement améliorés pour améliorer l'efficacité et réduire les erreurs. Éventuellement, les systèmes devraient être en mesure d'intégrer une multitude de caméras afin de rendre l'analyse de trafic plus performante et rendre la zone couverte plus grande. Pour ce qui est de la mesure automatique des distances de dépassement de cyclistes, il serait intéressant de refaire le projet sur d'autres sites et angles de la caméra afin de déterminer le scénario le plus performant et

d'investiguer si les comportements des conducteurs sont différents selon les caractéristiques du site.

RÉFÉRENCES

- Aarts, L., & Van Schagen, I. (2006). Driving Speed and the Risk of Road Crashes: A Review. *Accident Analysis and Prevention*, 38(2), 215-224. doi:10.1016/j.aap.2005.07.004
- AASHTO. (2004). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets* (5^e éd.). Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Abbas, S. K. S., Adnan, M. A., & Endut, I. R. (2011). Exploration of 85th Percentile Operating Speed Model on Horizontal Curve: A Case Study for Two-Lane Rural Highways. *Procedia Social and Behaviour Sciences*, 16, 352-363. doi:10.1016/j.sbspro.2011.04.456
- Adnan, M. A., Sulaiman, N., Zainuddin, N. I., & Tuan Besar, T. B. H. (2013). Vehicle Speed Measurement Technique Using Various Speed Detection Instrumentation. Dans *2013 IEEE Business Engineering and Industrial Applications Colloquium (BEIAC)* (p. 668-672). Langkawi, Malaysia.
- Ali, A. A., & Hussein, H. A. (2016). *Distance estimation and vehicle position detection based on monocular camera*. Communication présentée à 2016 Al-Sadeq International Conference on Multidisciplinary in IT and Communication Science and Applications (AIC-MITCSA), Baghdad, Iraq.
- Anderson-Trocme, P., Stipancic, J., Miranda-Moreno, L. F., & Saunier, N. (2015). *Performance Evaluation and Error Segregation of Video-Collected Traffic Speed Data*. Communication présentée à 94th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Baum, H. M., Wells, J. K., & Lund, A. K. (1991). The Fatality Consequences of the 65 mph Speed Limits, 1989. *Journal of Safety Research*, 22(4), 171-177. doi:Doi 10.1016/0022-4375(91)90027-S
- Bella, F. (2013). Driver Perception of Roadside Configurations on Two-Lane Rural Roads: Effects on Speed and Lateral Placement. *Accident Analysis and Prevention*, 50, 251-262. doi:10.1016/j.aap.2012.04.015
- Bella, F. (2015). Coordination of Horizontal and Sag Vertical Curves on Two-Lane Rural Roads: Driving Simulator Study. *IATSS Research*, 39(1), 51-57. doi:10.1016/j.iatssr.2015.02.002
- Bellalite, L. (2011). *Étude des conditions optimales correspondant aux différentes limites de vitesse en milieu urbain*. Université de Sherbrooke. Tiré de <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1099051.pdf>
- Belmont, D. M. (1954). Effect of Shoulder Width on Accidents on Two-Lane Tangents. Dans *Highway Research Board Bulletin 91* (p. 29-32).
- Ben-Bassat, T., & Shinar, D. (2011). Effect of Shoulder Width, Guardrail and Roadway Geometry on Driver Perception and Behavior. *Accident Analysis and Prevention*, 43(6), 2142-2152. doi:10.1016/j.aap.2011.06.004
- Boroujerdian, A. M., Seyedabrishami, E., & Akbarpour, H. (2016). Analysis of Geometric Design Impacts on Vehicle Operating Speed on Two-Lane Rural Roads. *Procedia Engineering*, 161, 1144-1151. doi:10.1016/j.proeng.2016.08.529

- Brüde, U., & Larsson, J. (1993). Models for predicting accidents at junctions where pedestrians and cyclists are involved. How well do they fit? *Accident Analysis & Prevention*, 25(5), 499-509. doi:10.1016/0001-4575(93)90001-d
- Cackowski, J. M., & Nasar, J. L. (2003). The Restorative Effects of Roadside Vegetation: Implications for Automobile Driver Anger and Frustration. *Environment and Behavior*, 35(6), 736-751. doi:10.1177/0013916503256267
- Cartes, O. (2002). Multiple Perspectives. Dans R. Fuller & J. A. Santos (édit.), *Human Factors for Highway Engineers* (p. 11-21): Elsevier Science Ltd.
- Cavallaro, A., Steiger, O., & Ebrahimi, T. (2005). Tracking Video Objects in Cluttered Background. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 15(4), 575-584. doi:10.1109/TCSVT.2005.844447
- Cirillo, J. A. (1968). Interstate System Crash Research: Study II, Interim report II. *Public Roads*, 35, 71-75.
- Cloutier, M.-S., Lachapelle, U., & Saunier, N. (2018). *Mesurer l'impact sur la sécurité routière d'une modification de limite de vitesse sur le réseau routier du Québec*. Réalisé pour le compte du Ministère des Transports, Projet R794.1, Rapport non publié.
- Comte, S., Varhelyi, A., & Santos, J. (1997). *The Effects of ATT and Non-ATT Systems and Treatments on Driver Speed Behaviour*. Espoo, Finland: Working Paper R 3.1.1 in the MASTER Project. VTT.
- Dalal, N., & Triggs, B. (2005). *Histograms of oriented gradients for human detection*. Communication présentée à IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (vol. 1, p. 886-893). doi:10.1109/CVPR.2005.177
- Dang, V.-C., Kubo, M., Sato, H., Yamaguchi, A., & Namatame, A. (2014). *A simple braking model for detecting incidents locations by smartphones*. Communication présentée à the 2014 Seventh IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Defense Applications (CISDA), Hanoi, Vietnam. doi:10.1109/CISDA.2014.7035625
- Dart, O. K., & Mann, L. (1970). Relationship of Rural Highway Geometry to Accident Rates in Louisiana. Dans *Highway Research Board* 312 (p. 1-16). Washington, D.C.
- Davis, G. A. (2002). Is the claim that 'variance kills' an ecological fallacy ? *Accident Analysis and Prevention*, 34(3), 343-346. doi:10.1016/S0001-4575(01)00031-8
- De Pauw, E., Daniels, S., Thierie, M., & Brijs, T. (2014). Safety Effects of Reducing the Speed Limit from 90 km/h to 70 km/h. *Accident Analysis and Prevention*, 62, 425-431. doi:10.1016/j.aap.2013.05.003
- De Waard, D., Jessurun, M., Steyvers, F. J. J. M., Raggatt, P. T. F., & Brookhuis, K. A. (1995). The Effect of Road Layout and Road Environment on Driving Performance, Drivers' Physiology and Road Appreciation. *Ergonomics*, 38(7), 1395-1407. doi:10.1080/00140139508925197
- Donnell, E. T., Gayah, V. V., Yu, Z., Li, L., & DePrator, A. (2016). *Speed Limits Set Lower Than Engineering Recommendations* (Rapport n° FHWA/MT-16-008/8225-01). Pennsylvania, U.S.A.: The Thomas D.Larson Pennsylvania Transportation Institute.

- Easa, S., & Ganguly, C. (2005). Modeling Driver Visual Demand on Complex Horizontal Alignments. *Journal of Transportation Engineering-Asce*, 131(8), 583-590. doi:10.1061/(Asce)0733-947x(2005)131:8(583)
- Elvik, R. (1995). The Safety Value of Guardrails and Crash Cushions: A Meta-Analysis of Evidence from Evaluation Studies. *Accident Analysis and Prevention*, 27(4), 523-549. doi:10.1016/0001-4575(95)00003-I
- Elvik, R. (2009). The non-linearity of risk and the promotion of environmentally sustainable transport. *Accident Analysis and Prevention*, 41(4), 849-855. doi:10.1016/j.aap.2009.04.009
- Elvik, R. (2013). A before-after study of the effects on safety of environmental speed limits in the city of Oslo, Norway. *Safety Science*, 55, 10-16. doi:10.1016/j.ssci.2012.12.007
- Elvik, R. (2017). A synthesis of studies of access point density as a risk factor for road accidents. *Accident Analysis and Prevention*, 107, 1-10. doi:10.1016/j.aap.2017.07.006
- Elvik, R., Christensen, P., & Amundsen, A. (2004). *Speed and road accidents - An evaluation of the Power Model* (Rapport n° 740/2024). Oslo: Institute of Transport Economics TOI.
- Farmer, C. M. (2017). Relationship of traffic fatality rates to maximum state speed limits. *Traffic Injury Prevention*, 18(4), 375-380. doi:10.1080/15389588.2016.1213821
- Farmer, C. M., Retting, R. A., & Lund, A. K. (1999). Changes in motor vehicle occupant fatalities after repeal of the national maximum speed limit. *Accident Analysis and Prevention*, 31(5), 537-543. Tiré de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10440551>
- FHWA. (2017). *Road Safety Fundamentals: Concepts, Strategies, and Practices that Reduce Fatalities and Injuries on the Road* (Rapport n° FHWA-SA-18-003). Washington, DC: Federal Highway Administration.
- Fildes, B., & Lee, S. (1993). *The speed review: Road environment, behavior, speed limits, enforcement and crashes*. Canberra, Australie: Monash University Accident Research Centre, préparé pour Road Safety Bureau, New South Wales, et Federal Office of Road Safety.
- Fildes, B. N., Fletcher, M. R., & Corrigan, J. M. (1987). *Speed perception I: Drivers' judgements of safety and speed on urban and rural straight roads* (Rapport n° CR 54). Canberra, Australie: Federal Office of Road Safety, Department of Transport and Communication.
- Fitzpatrick, K., Carlson, P., Brewer, M., & Wooldridge, M. (2001). Design factors that affect driver speed on suburban streets. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1751(1), 18-25. doi:10.3141/1751-03
- Fitzpatrick, K., Carlson, P., Brewer, M., & Wooldridge, M. D. (2003). *Design speed, operating speed and posted speed limit practices*. Communication présentée à 82nd Annual Conference Proceedings [CD-ROM], Washington, DC.
- Fitzpatrick, K., Carlson, P. J., Wooldridge, M. D., & Brewer, M. A. (2000). *Design factors that affect driver speed on suburban arterials* (Rapport n° FHWA/A/TX-00/1769-3). Austin: Texas Transportation Institute.

- Forbes, G. J., Gardner, T., McGee, H., & Srinivasan, R. (2012). *Methods and Practices for Setting Speed Limits: An Informational Report* (Rapport n° FHWA-SA-12-004). Washington, DC: Federal Highway Administration.
- Friedman, L. S., Barach, P., & Richter, E. D. (2007). Raised speed limits, case fatality and road deaths: a six year follow-up using ARIMA models. *Injury Prevention*, 13(3), 156-161. doi:10.1136/ip.2006.014027
- Friedman, L. S., Hedeker, D., & Richter, E. D. (2009). Long-term effects of repealing the national maximum speed limit in the United States. *American Journal of Public Health*, 99(9), 1626-1631. doi:10.2105/AJPH.2008.153726
- Garber, S., & Graham, J. D. (1990). The effects of the new 65 mile-per-hour speed limit on rural highway fatalities: A state-by-state analysis. *Accident Analysis and Prevention*, 22(2), 137-149. Tiré de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/2331289>
- Gargoum, S. A., El-Basyouny, K., & Kim, A. (2016). Towards setting credible speed limits: Identifying factors that affect driver compliance on urban roads. *Accident Analysis and Prevention*, 95(Pt A), 138-148. doi:10.1016/j.aap.2016.07.001
- Gayah, V. V., Donnell, E. T., Yu, Z., & Li, L. (2018). Safety and operational impacts of setting speed limits below engineering recommendations. *Accident Analysis and Prevention*, 121, 43-52. doi:10.1016/j.aap.2018.08.029
- Glennon, J. (1987). *Effect of alignment on highway safety*. Washington, DC: Transportation Research Board.
- Gluck, J., Levinson, H. S., & Stover, V. (1999). *Impacts of access management techniques* (Rapport n° 420). Washington, DC: TRB, National Research Council.
- Godley, S. T., Triggs, T. J., & Fildes, B. N. (2004). Perceptual lane width, wide perceptual road centre markings and driving speeds. *Ergonomics*, 47(3), 237-256. doi:10.1080/00140130310001629711
- Goldenbeld, C., & van Schagen, I. (2007). The credibility of speed limits on 80 km/h rural roads: The effects of road and person(ality) characteristics. *Accident Analysis and Prevention*, 39(6), 1121-1130. doi:10.1016/j.aap.2007.02.012
- Government of BC. (2014). *Rural Highway Safety and Speed Review*. Tiré de https://www2.gov.bc.ca/assets/gov/driving-and-transportation/reports-and-reference/reports-and-studies/planning-strategy-economy/rural_hwy_safety_speed_review_technical.pdf
- Hadi, M. A., Aruldas, J., Chow, L.-F., & Wattleworth, J. A. (1995). Estimating safety effects of cross-section design for various highway types using negative binomial regression. *Transportation Research Record* (1500), 169-177.
- Hamdar, S. H., Qin, L., & Talebpour, A. (2016). Weather and road geometry impact on longitudinal driving behavior: Exploratory analysis using an empirically supported acceleration modeling framework. *Transportation Research Part C*, 67, 193-213. doi:10.1016/j.trc.2016.01.017

- Harwood, D. W., Council, F. M., Hauer, E., Hughes, W. E., & Vogt, A. (2000). *Prediction of the expected safety performance of rural two-lane highways* (Rapport n° FHWA-RD-99-207). Virginia: Office of Safety Research and Development, Federal Highway Administration.
- Hauer, E. (2009). Speed and Safety. *Transportation Research Record*, 2103(1), 10-17. doi:10.3141/2103-02
- Heimbach, C. L., Cribbins, P. D., & Chang, M. S. (1983). Some partial consequences of reduced traffic lane widths on urban arterials. *Transportation Research Record*, 923, 69-72.
- Hussein, M., Sayed, T., Reyad, P., & Kim, L. (2015). Automated Pedestrian Safety Analysis at a Signalized Intersection in New York City: Automated Data Extraction for Safety Diagnosis and Behavioral Study. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2519(1), 17-27. doi:10.3141/2519-03
- Islam, M. T., El-Basyouny, K., & Ibrahim, S. E. (2014). The impact of lowered residential speed limits on vehicle speed behavior. *Safety Science*, 62, 483-494. doi:10.1016/j.ssci.2013.10.006
- Ismail, K., Sayed, T., & Saunier, N. (2013). A methodology for precise camera calibration for data collection applications in urban traffic scenes. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40(1), 57-67. doi:10.1139/cjce-2011-0456
- Jacob, A., Dhanya, R., & Anjaneyulu, M. V. L. R. (2013). Geometric design consistency of multiple horizontal curves on two-lane rural highways. *2nd Conference of Transportation Research Group of India (2nd Ctrg)*, 104, 1068-1077. doi:10.1016/j.sbspro.2013.11.202
- Jacobsen, P. L. (2003). Safety in numbers: more walkers and bicyclists, safer walking and bicycling. *Injury Prevention*, 9(3), 205-209. doi:10.1136/ip.9.3.205
- Jacobsen, P. L., Racioppi, F., & Rutter, H. (2009). Who owns the roads? How motorised traffic discourages walking and bicycling. *Injury Prevention*, 15(6), 369-373. doi:10.1136/ip.2009.022566
- Kanellaidis, G., Golias, J., & Zarifopoulos, K. (1995). A survey of driver's attitudes toward speed limit violations. *Journal of Safety Research*, 26(1), 31-40. doi:10.1016/0022-4375(94)00025-5
- Kassim, A., Ismail, K., & Hassan, Y. (2014). Automated measuring of cyclist – motor vehicle post encroachment time at signalized intersections. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(7), 605-614. doi:10.1139/cjce-2013-0565
- Klein, L. A., Mills, M. K., & Gibson, D. R. P. (2006). *Traffic Detector Handbook: Third Edition* (Rapport n° FHWA-HRT-06-139). Washington, DC: Federal Highway Administration.
- Kloeden, C. N., McLean, A. J., & Moore, V. M. (1997). *Travelling speed and the risk of crash involvement. Volume 1 : Findings* (Rapport n° CR 172). Canberra, Australie: Federal Office of Road Safety
- Kloeden, C. N., Ponte, G., & McLean, A. J. (2001). *Travelling speed and the rate of crash involvement on rural roads* (Rapport n° CR 204). Civic Square, ACT: Australian Transport Safety Bureau ATSB.

- Kloeden, C. N., Woolley, J. E., & McLean, A. J. (2006). *Further evaluation of the South Australian default 50 km/h speed limit* (Rapport n° CASR034). University of Adelaide, Australia: Centre for Automotive Safety Research.
- Koller, D., Daniilidis, K., & Nagel, H. H. (1993). Model-Based Object Tracking in Monocular Image Sequences of Road Traffic Scenes. *International Journal of Computer Vision*, 10(3), 257-281. Tiré de <Go to ISI>://WOS:A1993LP38600003
- Leduc, G. (2008). Road traffic data: Collection methods and applications. *Working Papers on Energy, Transport and Climate Change*, 1, 1-55.
- Litman, T., & Fitzroy, S. (2018). *Safe travels: Evaluating transportation demand management traffic safety impacts*. Victoria, BC: Victoria Transport Policy Institute. Tiré de <http://www.vtpi.org/safetrav.pdf>
- Ma, Y., Zeng, Y., & Yang, X. (2010). *Impact of lane width on vehicle speed of urban arterials*. Communication présentée à Proceedings of the 10th International Conference of Chinese Transportation Professionals, Beijing, Chine (p. 1844-1852).
- Mackenzie, J. R. R., Kloeden, C. N., & Hutchinson, T. P. (2015). *Reduction of speed limit from 110 km/h to 100 km/h on certain roads in South Australia: a follow up evaluation*. Communication présentée à Australasian Road Safety Conference 2015, Gold Coast, Australia.
- Martens, M., Comte, S., & Kaptein, N. (1997). *The effects of road design on speed behaviour: A literature review* (Rapport n° 2.3.1). The European Commission under the Transport RTD Programme of the fourth Framework programme: University of Leeds, UK.
- Mecheri, S., Rosey, F., & Lobjois, R. (2017). The effects of lane width, shoulder width, and road cross-sectional reallocation on drivers' behavioral adaptations. *Accident Analysis and Prevention*, 104, 65-73. doi:10.1016/j.aap.2017.04.019
- Ministère des Transports du Québec. (2002). *Guide de détermination des limites de vitesse sur les chemins du réseau routier municipal*. Tiré de https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/securite-signalisation/securite/moderation-vitesse/Documents/guide_determination_limites_vitesse_muni.pdf
- Ministère des Transports du Québec. (2014). Tracé et profil. Dans *Tome I - Conception routière*. Québec: Les Publications du Québec.
- Ministerio de Fomento. (2016). *Instrucción de carreteras: Norm 3.1-IC*. Trazado: Madrid2000
- Ministry of Works and Transport. (2004). *Traffic data collection and analysis*. Gaborone, Botswana: Ministry of Works and Transport, Roads Department. Tiré de https://www.vegvesen.no/_attachment/336339/binary/585485
- Morency, C., Trépanier, M., Saunier, N., Tessier, M.-A., Faucher, J., Bourdeau, J.-S., & Giraud, A. (2017). *Projet de recherche sur le développement d'un outil de suivi et d'analyse des conditions de circulation sur le réseau routier du MTMDET de la région de Montréal*. Polytechnique de Montréal. Réalisé pour le compte de Transports Québec. Tiré de <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1200488.pdf>
- Naderi, J. R., Kweon, B. S., & Maghelal, P. (2008). The Street Tree Effect and Driver Safety. *ITE Journal on the Web*, 78(2), 69-73.

- National Highway Traffic Safety Administration. (1998). *Report to Congress: The Effect of Increased Speed Limits in the Post-NMSL Era* (Rapport n° DOT-HS-808-637). Washington, DC: US Department of Transportation.
- Nilsson, G. (1982). The effects of speed limits on traffic crashes in Sweden. Dans *Proceedings of the international symposium on the effects of speed limits on traffic crashes and fuel consumption, Dublin*. Paris: Organisation for Economy, Co-operation, and Development (OECD).
- Nilsson, G. (2004). *Traffic safety dimensions and the power model to describe the effect of speed on safety* (Rapport n° Bulletin 221). Lund: Lund Institute of Technology.
- OECD/ECMT. (2006). *Speed Management*. Paris: OECD Publishing.
- Parsons, R., Tassinary, L. G., Ulrich, R. S., Hebl, M. R., & Grossman-Alexander, M. (1998). The view from the road: implications for stress recovery and immunization. *Journal of Environmental Psychology*, 18(2), 113-140. doi:10.1006/jevp.1998.0086
- Partyka, S. C. (1991). Simple models of fatality trends revisited seven years later. *Accident Analysis and Prevention*, 23(5), 423-430. doi:10.1016/0001-4575(91)90061-9
- Pucher, J., Buehler, R., & Seinen, M. (2011). Bicycling renaissance in North America? An update and re-appraisal of cycling trends and policies. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 45(6), 451-475. doi:10.1016/j.tra.2011.03.001
- Pucher, J., & Dijkstra, L. (2000). Making Walking and Cycling Safer: Lessons from Europe. *Transportation Quarterly*, 54(3), 25-50.
- Research Triangle Institute. (1970). *Speed and accidents* (vol. I). Washington DC: US Department of Transportation.
- Richter, E. D., Barach, P., Friedman, L., Krikler, S., & Israeli, A. (2004). Raised speed limits, speed spillover, case-fatality rates, and road deaths in Israel: a 5-year follow-up. *American Journal of Public Health*, 94(4), 568-574. Tiré de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15054007>
- Saunier, N., & Sayed, T. (2006). *A feature-based tracking algorithm for vehicles in intersections*. Communication présentée à The 3rd Canadian Conference on Computer and Robot Vision, Québec, Canada. doi:10.1109/CRV.2006.3
- Saxena, M. (2010). *Comparison of various methods to compute access density and proposing a weighted methodology*. (Doctoral thesis, University of South Florida, Tampa).
- Sayed, T., & Sacchi, E. (2016). Evaluating the safety impact of increased speed limits on rural highways in British Columbia. *Accident Analysis and Prevention*, 95(Pt A), 172-177. doi:10.1016/j.aap.2016.07.012
- Sayed, T., Zaki, M. H., & Autey, J. (2013). Automated safety diagnosis of vehicle–bicycle interactions using computer vision analysis. *Safety Science*, 59, 163-172. doi:10.1016/j.ssci.2013.05.009
- Schilling, H., Bulatov, D., & Middelmann, W. (2018). Object-based detection of vehicles using combined optical and elevation data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 136, 85-105. doi:10.1016/j.isprsjprs.2017.11.023

- Seabold, S., & Perktold, J. (2010). *Statsmodels: Econometric and Statistical Modeling with Python*. Communication présentée à Proceedings of the 9th Python in Science Conference.
- Shallam, R. D. K., & Ahmed, M. A. (2016). Operating speed models on horizontal curves for two-lane highways. *Transportation Research Procedia*, 17, 445-451. doi:10.1016/j.trpro.2016.11.086
- Shankar, V., Mannering, F., & Barfield, W. (1996). Statistical analysis of accident severity on rural freeways. *Accident Analysis and Prevention*, 28(3), 391-401. Tiré de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8799444>
- Sliogeris, J. (1992). *110 kilometre per hour speed limit - Evaluation of road safety effects* (Rapport n° GR 92-8). Carlton, Australia: Vic Roads, Road and Environment Safety, Road Safety Division.
- Smith, B. L., & Lamm, R. (1994). Coordination of horizontal and vertical alinement with regard to highway esthetics. *Transportation Research Record*, 1445, 73-85. Tiré de <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1994/1445/1445-008.pdf>
- Sochor, J., Juranek, R., Spanhel, J., Marsik, L., Siroky, A., Herout, A., & Zemcik, P. (2018). Comprehensive Data Set for Automatic Single Camera Visual Speed Measurement. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1-11. doi:10.1109/tits.2018.2825609
- Solomon, D. (1964). *Accidents on main rural highways related to speed, driver and vehicle*. Bureau of Public Roads. U.S. Department of Commerce. United States Government Printing Office, Washington, D.C.
- Stamatiadis, N., Pigman, J., Sacksteder, J., Ruff, W., & Lord, D. (2009). *Impact of shoulder width and median width on safety*. NCHRP (Rapport n° 633). Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- Strathman, J. G., Duecker, K. J., Zhang, J., & Williams, T. (2001). *Analysis of design attributes and crashes on the Oregon highway system* (Rapport n° FHWA-OR-RD-02-01). Washington, D.C.: FHWA.
- Strauss, J., Miranda-Moreno, L. F., & Morency, P. (2013). Cyclist activity and injury risk analysis at signalized intersections: a Bayesian modelling approach. *Accident Analysis & Prevention*, 59, 9-17. doi:10.1016/j.aap.2013.04.037
- Strauss, J., Miranda-Moreno, L. F., & Morency, P. (2014). Multimodal injury risk analysis of road users at signalized and non-signalized intersections. *Accident Analysis & Prevention*, 71, 201-209. doi:10.1016/j.aap.2014.05.015
- Strauss, J., Zangenehpour, S., Miranda-Moreno, L. F., & Saunier, N. (2017). Cyclist deceleration rate as surrogate safety measure in Montreal using smartphone GPS data. *Accident Analysis and Prevention*, 99, 287-296. doi:10.1016/j.aap.2016.11.019
- Summala, H. (1996). Accident risk and driver behaviour. *Safety Science*, 22 (1-3), 103-117. doi:10.1016/0925-7535(96)00009-4
- Sun, S.-J., & Yang, X.-D. (2015). *Method of CCD Camera Calibration Based on OpenCV*. Communication présentée à 2015 International Conference on Industrial Informatics - Computing Technology, Intelligent Technology, Industrial Information Integration, Wuhan, China. doi:10.1109/ICIICII.2015.96

- Tay, R., & Churchill, A. (2007). Effect of different median barriers on traffic speed. *Canadian Journal of Transportation*, 1(1), 56-66.
- Tomasi, C., & Kanade, T. (1991). *Detection and Tracking of Point Features* (Rapport n° CMU-CS-91-132). Carnegie Mellon University.
- TRB. (1998). *Managing Speed: Review of current practice for setting and enforcing speed limits* (Rapport n° 254). Washington DC: Transport Research Board, National Research Council.
- Vadeby, A., & Forsman, A. (2017). Traffic safety effects of new speed limits in Sweden. *Accident Analysis and Prevention*, 114, 34-39. doi:10.1016/j.aap.2017.02.003
- Ville de Montréal. (2008). *Plan de transport*. Montréal, QC: Tiré de http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=8957,99681670&_dad=portal&_schema=PORTAL
- Wang, Y., & Nihan, N. L. (2004). Estimating the risk of collisions between bicycles and motor vehicles at signalized intersections. *Accident Analysis & Prevention*, 36(3), 313-321. doi:10.1016/s0001-4575(03)00009-5
- Warner, H. W., & Aberg, L. (2008). Drivers' beliefs about exceeding the speed limits. *Transport Research Part F*, 11(5), 376-389. doi:10.1016/j.trf.2008.03.002
- White, S. B., & Nelson, C. (1970). Some effects of measurement errors in estimating involvement rate as a function of deviation from mean traffic speed. *Journal of Safety Research*, 2(2), 67-72.
- Wilmot, C. G., & Khanal, M. (1999). Effect of speed limits on speed and safety: A review. *Transport Reviews*, 19(4), 315-329. doi:10.1080/014416499295420
- Wolf, K. L., & Bratton, N. (2006). Urban Trees and Traffic Safety: Considering U.S. Roadside Policy and Crash Data. *Arboriculture and Urban Forestry*, 32(4), 170-179.
- Wong, S. C., Sze, N. N., Lo, H. K., Hung, W. T., & Loo, B. P. Y. (2005). Would relaxing speed limits aggravate safety? A case study of Hong Kong. *Accident Analysis and Prevention*, 37(2), 377-388. doi:10.1016/j.aap.2004.09.008
- Yagar, S., & van Aerde, M. (1983). Geometric and environmental effects on speed of 2-lane highways. *Transport Research Part A: General*, 17(4), 315-325. doi:10.1016/0191-2607(83)90094-8
- Yu, L., Zhang, D., Chen, X., & Hauptmann, A. (2018). *Traffic Danger Recognition With Surveillance Cameras Without Training Data*. Communication présentée à 15th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS), Auckland, New Zealand. doi:10.1109/AVSS.2018.8639166
- Zaki, M. H., Sayed, T., & Cheung, A. (2013). Computer Vision Techniques for the Automated Collection of Cyclist Data. *Transportation Research Record*, 2387(1), 10-19. doi:10.3141/2387-02
- Zangenehpour, S., Miranda-Moreno, L. F., & Saunier, N. (2015). Automated classification based on video data at intersections with heavy pedestrian and bicycle traffic: Methodology and application. *Transport Research Part C*, 56, 161-176. doi:10.1016/j.trc.2015.04.003

- Zangenehpour, S., Strauss, J., Miranda-Moreno, L. F., & Saunier, N. (2016). Are signalized intersections with cycle tracks safer? A case-control study based on automated surrogate safety analysis using video data. *Accident Analysis and Prevention*, 86, 161-172. doi:10.1016/j.aap.2015.10.025
- Zegeer, C. V., & Deacon, J. A. (1987). Effect of lane width, shoulder width, and shoulder type on highway safety. Dans *State of the Art Report Number 6: Relationship between safety and key highway features* (p. 1-21). Washington, DC: Transportation Research Board.
- Zegeer, C. V., Stewart, R., Council, F. M., Reinfurt, D. W., & Hamilton, E. (1992). Safety effects of geometric improvements on horizontal curves. *Transportation Research Record* 1356, 11-19.
- Zhang, Z. (2000). A Flexible New Technique for Camera Calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11), 1330-1334. doi:10.1109/34.888718

ANNEXE A GRILLE D'OBSERVATION



GRILLE D'OBSERVATION

Caractéristiques du site

Relevé # _____ Site # _____

Personne(s) présente(s)

Date _____

Heure Début _____ à Fin _____

Conditions climatiques

- 1 **Visibilité** ☐ Bonne ☐ Moyenne ☐ Mauvaise
- 2 **Météo** ☐ Ensoleillé ☐ Nuageux ☐ Pluvieux
☐ Autre: _____
- 3 **Condition de la chaussée** ☐ Sèche ☐ Mouillée
- 4 **Remarques** _____

Localisation du relevé de vitesse

<p>5 Localisation (description)</p> <p>_____</p>	<p>7 Équipement <input type="checkbox"/> Tubes <input type="checkbox"/> Plaques <input type="checkbox"/> Pistolet <input type="checkbox"/> Autre: _____</p>
<p>6 Coordonnées GPS Latitude _____ Longitude _____</p>	<p>8 Direction(s) étudiée(s) <input type="checkbox"/> Nord <input type="checkbox"/> Est <input type="checkbox"/> Sud <input type="checkbox"/> Ouest</p>

Identification de la zone étudiée

<p>9 Municipalité _____</p> <p>10 Route (nom) _____</p> <p>11 Zone étudiée (description)</p> <p>Début _____</p> <p>Fin _____</p> <p>12 Localisation</p> <p>Début RTSS _____ Chainage _____</p> <p>Fin RTSS _____ Chainage _____</p>	<p>13 Longueur de la zone étudiée _____ km</p> <p>14 Milieu <input type="checkbox"/> Rural <input type="checkbox"/> Périurbain <input type="checkbox"/> Urbain</p> <p>15 Classification <input type="checkbox"/> Autoroute <input type="checkbox"/> Régionale <input type="checkbox"/> Locale <input type="checkbox"/> Nationale <input type="checkbox"/> Collectrice <input type="checkbox"/> Accès</p> <p>16 DJMA _____ véh/jour</p> <p>17 Vitesse affichée (actuelle) _____ km/h</p> <p>18 Changement limite de vitesse <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non</p> <p>Si oui, date du changement _____</p> <p>Vitesse affichée (antérieure) _____ km/h</p>
---	---

Caractéristiques de la zone étudiée

<p>19 Type de chaussée <input type="checkbox"/> Pavée <input type="checkbox"/> Non-pavée</p> <p>20 Qualité de la chaussée <input type="checkbox"/> Bonne <input type="checkbox"/> Moyenne <input type="checkbox"/> Mauvaise</p> <p>21 État du marquage <input type="checkbox"/> Bon <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Mauvais <input type="checkbox"/> Inexistant</p> <p>22 Sens unique <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non</p>	<p>23 Nombre de voies</p> <p>Direction () : _____ voie(s)</p> <p>Direction () : _____ voie(s)</p> <p>24 Largeur des voies</p> <p>Direction () : _____ m</p> <p>Direction () : _____ m</p>
---	---



**POLYTECHNIQUE
MONTRÉAL**

LE GÉNIE
EN PREMIÈRE CLASSE

GRILLE D'OBSERVATION

Caractéristiques du site

Relevé # _____ Site # _____

Caractéristiques de la zone étudiée (suite)	
<p>25 Chaussée séparée <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non</p> <p>Si oui, type de séparation <input type="checkbox"/> Barrière <input type="checkbox"/> Terre-plein</p> <p>Largeur de la séparation _____ m</p> <p>Hauteur de la barrière _____ m</p> <p>26 Présence d'un accotement <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non</p> <p>Si oui, type d'accotement <input type="checkbox"/> Pavé <input type="checkbox"/> Non-pavé</p> <p>Largeur moyenne des accotements</p> <p>Direction () : _____ m</p> <p>Direction () : _____ m</p> <p>27 Présence d'un trottoir <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non</p> <p>Si oui, largeur des trottoirs</p> <p>Direction () : _____ m</p> <p>Direction () : _____ m</p> <p>28 Présence d'une voie cyclable <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non</p> <p>Si oui, type de voie cyclable <input type="checkbox"/> Chaussée désignée <input type="checkbox"/> Bande cyclable <input type="checkbox"/> Accotement revêtu <input type="checkbox"/> Piste cyclable</p> <p>Largeur de la voie cyclable _____ m</p> <p>29 Présence d'un fossé <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non</p> <p>Si oui, distance moyenne de la ligne de rive</p> <p>Direction () : _____ m</p> <p>Direction () : _____ m</p> <p>30 Présence de stationnements <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non</p> <p>Si oui, nombre de stationnements occupés sur rue</p> <p>Direction () : _____ /km</p> <p>Direction () : _____ /km</p> <p>31 Dégagement latéral</p> <p>Distance moyenne de la ligne de rive</p> <p>Direction () : _____ m</p> <p>Direction () : _____ m</p>	<p>32 Nombre d'entrées d'accès sur le site</p> <p>Résidentiel (5 logements et moins) _____</p> <p>Résidentiel (6 logements et plus) _____</p> <p>Commercial, industriel et institutionnel _____</p> <p>Ferme avec bâtiments _____</p> <p>Intersection de rues ou ruelles _____</p> <p>33 Nombre de bâtiments sur le site</p> <p>Résidentiel _____</p> <p>Commercial _____</p> <p>Industriel _____</p> <p>Institutionnel _____</p> <p>Autres (agricole, ferme ...) _____</p> <p>34 Présence d'une intersection <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non</p> <p>Si oui, distance à partir du relevé de vitesse (moins de 1 km)</p> <p>avant _____ m</p> <p>après _____ m</p> <p>Signalisation <input type="checkbox"/> Aucune <input type="checkbox"/> Feux <input type="checkbox"/> Arrêt</p> <p>35 Pente de la route _____ %</p> <p>36 Présence d'une courbe <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non</p> <p>Si oui, distance à partir du relevé de vitesse (moins de 1 km)</p> <p>avant _____ m</p> <p>après _____ m</p> <p>Rayon de courbure moyen</p> <p>avant _____ m</p> <p>après _____ m</p> <p>Longueur de la courbe</p> <p>avant _____ m</p> <p>après _____ m</p> <p>37 Ouvrage d'ingénierie <input type="checkbox"/> Aucun <input type="checkbox"/> Viaduc <input type="checkbox"/> Pont <input type="checkbox"/> Autre</p> <p>38 Présence de travaux de voirie <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non</p>



**POLYTECHNIQUE
MONTRÉAL**

LE GÉNIE
EN PREMIÈRE CLASSE

GRILLE D'OBSERVATION

Caractéristiques du site

Relevé # _____ Site # _____

Plan du site

Remarques et commentaires

ANNEXE B PRÉSENTATION DES SITES

Tableau B.1 : Présentation des sites du groupe cas-1 (changement de vitesse entre 2006 et 2013)
(suite)

Site	No Station	Ville	Route	Long. (m)	Classification	Milieu	V _{affichée} (km/h)		Année du chang.
							Avant	Après	
201	711	Saint-Donat	125	97	Collectrice	Rural	80	70	2009
202	749	Contrecoeur	132	3000	Nationale	Périurbain	90	70	2013
203	2586	Saint-Étienne-des-Grès	-	133	Collectrice	Rural	80	50	2009
204	2761	Maliotenam	-	837	Collectrice	Périurbain	80	70	2013
205	3068	Saint-Germain-de-Grantham	-	490	Nationale	Périurbain	80	70	2011
206	3157	Kingsey Falls	-	294	Collectrice	Rural	70	50	2007
207	3818	Sainte-Eulalie	161	1542	Nationale	Rural	80	90	2007
208	4000	Lanoraie	138	287	Nationale	Rural	80	70	2010
209	4021	Saint-Thomas	158	244	Nationale	Rural	90	70	2012
210	4032	Mont-Laurier	309	640	Régionale	Rural	90	70	2009
211	4039	Lac-des-Écorces	311	827	Collectrice	Rural	90	70	2013
212	4051	Brownsburg-Chatham	327	509	Régionale	Rural	90	70	2011
213	4078	Sainte-Julienne	337	287	Régionale	Rural	90	80	2010
214	4088	Saint-Jacques	341	3702	Régionale	Rural	90	80	2007
215	4099	Grenville-sur-la-Rouge	344	104	Collectrice	Rural	90	70	2009
216	4150	Lac-Saguay	-	370	Collectrice	Rural	90	70	2007
217	4170	Arundel	-	170	Collectrice	Rural	80	70	2008
218	4173	Wentworth-Nord	-	533	Collectrice	Rural	80	50	2006
219	4215	Lac-Supérieur	-	205	Collectrice	Rural	80	70	2006
220	4237	Saint-Thomas	-	1432	Collectrice	Rural	90	80	2006
221	4248	Saint-Barthélemy	-	705	Collectrice	Rural	90	70	2008
222	4256	Saint-Roch-de-l'Achigan	339	1876	Régionale	Rural	90	70	2009
223	4471	Rouyn-Noranda	-	599	Collectrice	Urbain	70	80	2007
224	4515	Les Îles-de-la-Madeleine	199	416	Nationale	Rural	80	70	2009
225	4566	La Minerve	-	506	Collectrice	Rural	80	70	2010

Tableau B.1 : Présentation des sites du groupe cas-1 (changement de vitesse entre 2006 et 2013)
(suite)

Site	No Station	Ville	Route	Long. (m)	Classification	Milieu	V affichée (km/h)		Année du chang.
							Avant	Après	
226	4922	Noyan	225	1900	Collectrice	Rural	90	80	2008
227	4935	Rougemont	229	1200	Collectrice	Rural	90	80	2008
228	4969	Havelock	202	5339	Régionale	Rural	70	80	2010
229	5029	Sainte-Clotilde	205	778	Collectrice	Rural	90	70	2006
230	5030	Sainte-Clotilde	205	1198	Collectrice	Rural	90	80	2006
231	5084	Roberval	-	152	Collectrice	Rural	50	80	2012
232	5479	Val-d'Or	117	412	Nationale	Urbain	90	70	2011
233	5510	Pont-Rouge	365	596	Régionale	Rural	90	50	2006
234	5561	Saint-Alban	-	142	Collectrice	Rural	80	50	2011
235	5614	Mercier	-	712	Régionale	Périurbain	80	70	2009
236	6243	Rouyn-Noranda	-	1682	Collectrice	Urbain	70	80	2007
237	6443	Lac-Brome	243	1748	Régionale	Rural	50	70	2008
238	7272	Saint-Georges-de-Windsor	-	1733	Collectrice	Rural	80	90	2009
239	7779	Coteau-du-Lac	338	140	Régionale	Périurbain	90	70	2008
240	7877	Saint-Jean-Baptiste	227	248	Régionale	Rural	90	50	2008
241	7951	Hinchinbrooke	202	3277	Régionale	Rural	70	80	2010
242	8101	Les Îles-de-la-Madeleine	-	211	Collectrice	Rural	80	70	2012
243	8102	Les Îles-de-la-Madeleine	-	943	Collectrice	Rural	80	70	2012
244	8103	Les Îles-de-la-Madeleine	-	560	Collectrice	Rural	80	70	2012
245	8144	Saint-Hyacinthe	137	459	Nationale	Urbain	70	50	2009
246	8360	Notre-Dame-de-Lourdes	-	640	Collectrice	Rural	90	70	2009
247	8415	Louiseville	138	3517	Nationale	Rural	90	80	2008
248	8509	Rivière-Bonaventure	-	751	Collectrice	Rural	70	90	2010
249	8641	Saint-Cyprien-de-Napierville	219	765	Régionale	Rural	90	70	2008
250	9068	Shawinigan	-	578	Régionale	Urbain	80	70	2007
251	9182	Papineauville	148	1341	Nationale	Rural	90	80	2011

Tableau B.1 : Présentation des sites du groupe cas-1 (changement de vitesse entre 2006 et 2013)
(fin)

Site	No Station	Ville	Route	Long. (m)	Classification	Milieu	V _{affichée} (km/h)		Année du chang.
							Avant	Après	
252	9200	Saint-Hyacinthe	224	209	Nationale	Urbain	80	70	2006
253	9472	Saint-Valère	161	2052	Nationale	Rural	80	90	2007
254	9522	Val-des-Monts	366	143	Collectrice	Périurbain	90	70	2006
255	9759	Les Îles-de-la-Madeleine	199	282	Nationale	Rural	50	80	2008
256	9783	Otter Lake	301	339	Régionale	Rural	90	50	2010
257	9821	Sainte-Eulalie	-	252	Collectrice	Rural	80	70	2013
258	9969	Les Îles-de-la-Madeleine	-	559	Collectrice	Rural	80	70	2007
259	10564	Grand-Remous	-	1709	Collectrice	Rural	80	70	2012
260	10573	Saint-Joseph-du-Lac	344	123	Régionale	Périurbain	80	50	2012

Tableau B.2 : Présentation des sites du groupe cas-2 (changement de vitesse entre 2013 et 2017)

Site	No Station	Ville	Route	Long. (m)	Classification	Milieu	V _{affichée} (km/h)		Année du chang.
							Avant	Après	
1	8116	Saint-Cyrille-de-Wendover	255	2390	Régionale	Périurbain	90	70	2016
2	7528	Sherbrooke	249	7515	Collectrice	Urbain	90	80	2014
3	8962	Sherbrooke	220	438	Collectrice	Urbain	70	50	2017
4	11870	Farnham	235	2478	Régionale	Rural	70	90	2015
5	7429	Mont-Saint-Hilaire	116	1281	Nationale	Périurbain	90	70	2016
6	6176	Saint-Mathias-sur-Richelieu	133	1771	Nationale	Périurbain	70	50	2015
7	5033	Sainte-Mélanie	205	1114	Collectrice	Rural	90	70	2016
8	10227	Léry	132	5054	Nationale	Périurbain	90	70	2015
9	10770	Rivière-Beaudette	338	1573	Régionale	Rural	90	80	2017
10	7364	Trois-Rivières	138	5755	Nationale	Urbain	70	50	2014
11	5157	Maskinongé	138	492	Nationale	Rural	90	70	2014
12	4083	Saint-Jean-de-Matha	337	4447	Collectrice	Rural	90	70	2015
13	1094	Saint-Barnabé	153	500	Régionale	Rural	90	70	2014
14	6587	Sainte-Agathe-des-Monts	329	1635	Régionale	Rural	90	70	2016
15	6339	Contrecoeur	132	1800	Nationale	Périurbain	90	70	2013
16	6389	Saint-Marc-sur-Richelieu	223	3556	Régionale	Rural	90	80	2015
17	10678	Salaberry-de-Valleyfield	201	625	Nationale	Urbain	70	50	2013
18	5193	Mont-Tremblant	327	3795	Collectrice	Rural	80	70	2013
19	10562	Mont-Tremblant	327	2053	Collectrice	Rural	80	70	2013
20	8726	Magog	247	8830	Collectrice	Périurbain	90	80	2015

Tableau B.3 : Présentation des sites du groupe témoin (sans changement de limite de vitesse)
(suite)

Site	No Station	Ville	Route	Long. (m)	Classification	Milieu	V affichée (km/h)
301	990	Franquelin	138	130	Nationale	Périurbain	90
302	1557	Sainte-Monique	226	2650	Collectrice	Rural	90
303	1714	Saint-Norbert-d'Arthabaska	263	1193	Collectrice	Rural	90
304	3129	Saint-Rémi-de-Tingwick	-	659	Collectrice	Rural	80
305	3147	Saint-Rémi-de-Tingwick	-	1530	Collectrice	Rural	80
306	3153	Warwick	-	971	Régionale	Rural	90
307	3156	Kingsey Falls	-	2229	Collectrice	Rural	80
308	3171	Bécancour	-	2344	Collectrice	Périurbain	80
309	3173	Nicolet	-	945	Collectrice	Rural	80
310	3175	Daveluyville	-	211	Collectrice	Rural	80
311	3772	Louiseville	138	1507	Nationale	Rural	90
312	3987	Mont-Laurier	117	1615	Nationale	Rural	90
313	4004	Brownsburg-Chatham	148	1362	Nationale	Rural	90
314	4223	Notre-Dame-de-Lourdes	-	640	Collectrice	Rural	70
315	5073	Les Cèdres	338	2931	Régionale	Périurbain	90
316	5268	Saint-Zotique	-	1186	Collectrice	Périurbain	80
317	5330	Cap-Santé	358	1297	Collectrice	Rural	90
318	6117	Cowansville	104	597	Régionale	Urbain	70
319	6322	Granby	112	1068	Nationale	Urbain	90
320	6444	Shefford	243	918	Régionale	Rural	90
321	6529	Verchères	-	1086	Collectrice	Périurbain	80
322	6578	Percé	132	3871	Nationale	Rural	90
323	6703	Cascapédia-Saint-Jules	-	4763	Collectrice	Rural	80
324	7059	Lac-Mégantic	161	1168	Régionale	Rural	90
325	7094	Saint-Côme	347	817	Régionale	Rural	90
326	7200	Waterville	-	913	Collectrice	Périurbain	80
327	7995	Gatineau	148	998	Nationale	Urbain	90
328	8113	Bécancour	263	1999	Collectrice	Périurbain	90
329	8289	Bécancour	132	817	Nationale	Périurbain	90

Tableau B.3 : Présentation des sites du groupe témoin (sans changement de limite de vitesse)
(fin)

Site	No Station	Ville	Route	Long. (m)	Classification	Milieu	V _{affichée} (km/h)
330	8435	Saint-Mathieu	-	655	Collectrice	Périurbain	80
331	8590	Val-des-Monts	366	39	Collectrice	Périurbain	70
332	8831	Sainte-Marie-Salomé	-	1159	Collectrice	Rural	90
333	8938	Déléage	107	280	Collectrice	Rural	80
334	10279	Sainte-Anne-de-Sabrevois	133	2132	Nationale	Rural	90
335	10311	Coteau-du-Lac	201	2443	Régionale	Périurbain	90
336	10409	Stanstead-Est	143	1455	Régionale	Rural	90
337	10477	Grenville-sur-la-Rouge	344	1066	Nationale	Rural	90
338	10579	Low	105	419	Nationale	Rural	90
339	10608	L'Assomption	341	2195	Régionale	Périurbain	90
340	11543	La Tuque	155	3424	Nationale	Rural	90
341	11544	La Tuque	155	3874	Nationale	Rural	90
342	12301	Alma	169	353	Nationale	Urbain	70
343	12441	Saint-Gédéon	-	1522	Collectrice	Rural	80

ANNEXE C – DIFFÉRENTIELS DES VITESSES MOYENNES PRATIQUÉES ET DES 85^E CENTILES DES VITESSES

Tableau C.1 : Différentiels des vitesses moyennes pratiquées et des 85^e centiles des vitesses
pour groupe cas-1 (suite)

Cat. (km/h)	Site	AVANT			APRÈS			Effet Vmoy (km/h)	Statistique	
		Vmoy (km/h)	V85 (km/h)	Écart-type (km/h)	Vmoy (km/h)	V85 (km/h)	Écart-type (km/h)		Test t	valeur-p
50-70	237	72,34	85,00	11,85	72,39	85,00	11,03	↑ 0,05	-0,30	0,762
50-80	231	64,15	75,00	12,19	57,05	65,00	9,67	↓ 7,10	29,20	< 0,001
	255	65,29	75,00	13,44	74,41	85,00	14,44	↑ 9,12	-61,63	< 0,001
70-50	206	68,53	75,00	12,55	65,01	75,00	12,76	↓ 3,52	13,60	< 0,001
	245	73,20	85,00	11,65	69,08	75,00	10,23	↓ 4,12	40,53	< 0,001
70-80	223	79,21	95,00	12,82	78,05	85,00	12,07	↓ 1,16	3,06	0,002
	228	80,28	95,00	15,94	83,88	95,00	12,99	↑ 3,60	-11,85	< 0,001
	236	84,72	105,00	18,84	88,80	105,00	15,52	↑ 4,07	-3,48	< 0,001
	241	90,99	105,00	15,16	87,83	105,00	15,13	↓ 3,16	8,59	< 0,001
70-90	248	86,20	105,00	17,41	92,90	105,00	18,21	↑ 6,70	-5,92	< 0,001
80-50	203	54,63	65,00	8,85	52,65	65,00	9,44	↓ 1,98	23,39	< 0,001
	218	71,26	85,00	10,53	74,72	85,00	11,97	↑ 3,46	-12,46	< 0,001
	234	65,70	75,00	8,36	30,94	30,00	5,37	↓ 34,76	111,84	< 0,001
	260	66,59	75,00	8,43	58,56	65,00	7,54	↓ 8,03	175,34	< 0,001
80-70	201	70,00	75,00	10,45	68,11	75,00	9,78	↓ 1,90	10,90	< 0,001
	204	81,29	95,00	11,50	77,30	85,00	9,85	↓ 3,99	21,00	< 0,001
	205	62,02	75,00	13,22	57,54	65,00	11,95	↓ 4,48	48,13	< 0,001
	208	82,22	95,00	11,02	77,34	85,00	9,29	↓ 4,88	48,95	< 0,001
	217	61,46	75,00	12,42	68,46	85,00	12,03	↑ 7,00	-12,83	< 0,001
	219	64,69	75,00	10,78	59,09	75,00	12,16	↓ 5,61	11,70	< 0,001
	224	65,29	75,00	14,54	63,33	75,00	13,52	↓ 1,96	13,62	< 0,001
	225	79,16	85,00	10,13	81,56	85,00	8,97	↑ 2,41	-13,78	< 0,001
	235	70,01	85,00	12,87	71,71	75,00	9,67	↑ 1,70	-16,94	< 0,001

Tableau C.1 : Différentiels des vitesses moyennes pratiquées et des 85^e centiles des vitesses pour
groupe cas-1 (suite)

Cat. (km/h)	Site	AVANT			APRÈS			Effet Vmoy (km/h)	Statistique	
		Vmoy (km/h)	V85 (km/h)	Écart-type (km/h)	Vmoy (km/h)	V85 (km/h)	Écart-type (km/h)		Test t	valeur-p
80-70	242	63,29	75,00	14,44	63,57	75,00	13,15	↑ 0,28	-1,49	0,137
	243	70,60	85,00	14,99	70,17	85,00	13,21	↓ 0,43	2,03	0,042
	244	66,73	75,00	11,61	67,34	75,00	11,38	↑ 0,61	-4,24	< 0,001
	250	79,90	95,00	11,91	79,35	85,00	11,41	↓ 0,56	6,30	< 0,001
	252	72,98	85,00	11,31	69,74	85,00	12,26	↓ 3,24	29,17	< 0,001
	257	75,58	85,00	13,59	72,30	85,00	13,79	↓ 3,28	25,42	< 0,001
	258	71,35	85,00	12,58	70,86	85,00	11,45	↓ 0,50	5,65	< 0,001
	259	68,76	75,00	12,00	65,56	75,00	10,98	↓ 3,20	23,66	< 0,001
80-90	207	87,19	105,00	15,90	86,93	105,00	14,63	↓ 0,25	2,25	0,025
	238	77,80	95,00	15,10	81,16	95,00	14,03	↑ 3,35	-13,20	< 0,001
	253	101,10	95,00	10,90	97,02	105,00	11,78	↓ 4,08	18,64	< 0,001
90-50	233	91,43	105,00	10,23	57,03	65,00	8,17	↓ 34,41	739,12	< 0,001
	240	80,17	95,00	14,47	58,64	65,00	10,98	↓ 21,53	160,45	< 0,001
	256	87,59	105,00	13,38	60,51	75,00	11,80	↓ 27,07	148,33	< 0,001
90-70	202	83,73	95,00	12,87	76,29	85,00	9,84	↓ 7,43	52,29	< 0,001
	209	87,98	95,00	12,93	77,06	85,00	12,15	↓ 10,92	186,29	< 0,001
	210	90,52	105,00	11,47	74,29	85,00	8,74	↓ 16,23	142,01	< 0,001
	211	79,81	95,00	12,77	81,00	95,00	12,75	↑ 1,19	-5,39	< 0,001
	212	85,50	95,00	12,87	77,43	85,00	10,87	↓ 8,07	76,46	< 0,001
	215	78,29	85,00	13,13	71,76	85,00	13,37	↓ 6,53	34,37	< 0,001
	216	72,57	85,00	13,91	70,11	85,00	13,66	↓ 2,46	2,52	0,012
	221	83,71	95,00	15,28	75,16	85,00	12,80	↓ 8,54	57,99	< 0,001
	222	61,75	75,00	10,85	70,96	85,00	11,43	↑ 9,21	-74,07	< 0,001
	229	75,02	95,00	15,51	71,88	85,00	12,42	↓ 3,14	15,95	< 0,001
	232	94,33	105,00	8,80	91,46	105,00	9,16	↓ 2,86	69,87	< 0,001
	239	78,27	85,00	12,82	75,93	85,00	9,58	↓ 2,34	21,96	< 0,001
	246	87,66	105,00	15,46	78,74	85,00	11,08	↓ 8,92	61,27	< 0,001
	249	77,42	85,00	15,90	74,30	85,00	9,35	↓ 3,12	30,56	< 0,001

Tableau C.1 : Différentiels des vitesses moyennes pratiquées et des 85^e centiles des vitesses
pour groupe cas-1 (fin)

Cat. (km/h)	Site	AVANT			APRÈS			Effet Vmoy (km/h)	Statistique	
		Vmoy (km/h)	V85 (km/h)	Écart-type (km/h)	Vmoy (km/h)	V85 (km/h)	Écart-type (km/h)		Test t	valeur-p
90-70	254	77,11	85,00	11,58	79,28	85,00	9,97	↑ 2,16	-22,98	< 0,001
90-80	213	81,56	95,00	11,71	82,35	95,00	12,17	↑ 0,79	-8,49	< 0,001
	214	82,66	95,00	17,05	80,58	95,00	13,51	↓ 2,08	11,46	< 0,001
	220	82,70	95,00	15,24	81,98	95,00	13,46	↓ 0,73	3,72	< 0,001
	226	75,21	95,00	16,36	75,55	85,00	15,15	↑ 0,34	-0,56	0,572
	227	86,44	105,00	15,63	79,27	95,00	12,08	↓ 7,17	40,57	< 0,001
	230	77,98	95,00	13,98	71,98	85,00	14,64	↓ 6,00	26,37	< 0,001
	247	79,16	95,00	15,15	79,46	85,00	12,95	↑ 0,30	-4,82	< 0,001
	251	88,45	95,00	12,18	85,53	95,00	12,45	↓ 2,92	54,36	< 0,001

Note :

La couleur des 85^e centiles des vitesses représente : rouge (augmentation de 10 km/h), bleu (diminution de 10 km/h)
et vert (diminution de plus de 10 km/h)

Tableau C.2 : Différentiels dans les vitesses pratiquées moyennes et des 85^e centiles des vitesses pour le groupe cas-2

Cat. (km/h)	Site	AVANT			APRÈS			Effet Vmoy (km/h)	Statistique	
		Vmoy (km/h)	V85 (km/h)	Écart-type (km/h)	Vmoy (km/h)	V85 (km/h)	Écart-type (km/h)		Test t	valeur-p
70-90	4	82,45	95,00	11,78	95,13	105,00	12,82	↑ 12,68	-45,41	< 0,001
70-50*	6	75,79	85,00	9,99	65,01	75,00	9,13	↓ 10,78	30,22	< 0,001
	17	69,20	75,00	10,40	71,88	85,00	9,89	↑ 2,68	-22,11	< 0,001
80-70	18	79,32	85,00	10,74	72,02	85,00	13,03	↓ 7,30	13,35	< 0,001
	19	102,02	115,00	11,94	72,61	85,00	10,53	↓ 29,40	64,74	< 0,001
90-80	2	84,77	95,00	13,28	86,12	95,00	11,82	↑ 1,35	-6,80	< 0,001
	9	75,76	85,00	11,48	79,99	95,00	13,81	↑ 4,22	-4,44	< 0,001
	16	85,11	95,00	12,29	80,14	95,00	12,44	↓ 4,97	6,71	< 0,001
	20	85,90	95,00	12,64	82,93	95,00	11,90	↓ 2,97	4,94	< 0,001
90-70**	1	93,07	105,00	12,03	91,67	105,00	14,71	↓ 1,40	1,97	0,050
	5	88,61	95,00	10,85	76,70	85,00	8,90	↓ 11,91	28,19	< 0,001
	8	73,53	85,00	9,18	73,81	85,00	8,06	↑ 0,28	-3,92	< 0,001
	11	94,25	105,00	11,14	86,51	95,00	13,19	↓ 7,74	48,31	< 0,001
	12	88,38	105,00	13,27	86,33	105,00	16,35	↓ 2,06	2,52	0,012
	14	75,98	85,00	10,52	76,03	85,00	12,55	↑ 0,06	-0,15	0,880
	15	83,45	95,00	13,32	77,96	105,00	21,03	↓ 5,50	6,42	< 0,001

* Les sites 3 et 10 ont été éliminés de l'analyse pour la catégorie 70-50 km/h.

** Les sites 7 et 13 ont été éliminés de l'analyse pour la catégorie 90-70 km/h.

Note :

La couleur des 85^e centiles des vitesses représente : rouge (augmentation de 10 km/h), bleu (diminution de 10 km/h) et vert (diminution de plus de 10 km/h)

Tableau C.3 : Vitesses pratiquées moyennes et 85^e centiles des vitesses pour le groupe témoin
(suite)

Catégorie (km/h)	Site	Vmoy (km/h)	V85 (km/h)	Écart-type (km/h)
70	314	82,57	95,00	13,86
	318	78,10	85,00	10,72
	331	74,05	85,00	11,16
	342	66,02	75,00	12,75
80	304	78,47	95,00	16,21
	305	92,86	105,00	15,97
	307	73,36	85,00	13,27
	308	86,67	105,00	18,32
	309	83,14	95,00	11,35
	310	82,58	95,00	15,10
	316	73,55	85,00	11,47
	321	78,86	85,00	10,51
	323	88,59	105,00	15,42
	326	83,56	95,00	11,27
	330	77,14	85,00	12,12
	333	74,50	85,00	11,60
	343	87,80	95,00	10,54
90	301	86,47	105,00	16,81
	302	92,92	105,00	14,45
	303	83,87	95,00	15,25
	306	75,44	85,00	12,19
	311	82,76	95,00	12,53
	312	84,41	95,00	11,64
	313	88,66	95,00	10,19
	315	86,20	95,00	12,25
	317	88,87	105,00	13,23
	319	83,32	95,00	12,01
	320	88,86	95,00	13,84
	322	91,10	105,00	12,28

Tableau C.3 : Vitesses pratiquées moyennes et 85^e centiles des vitesses pour le groupe témoin (Fin)

Catégorie (km/h)	Site	Vmoy (km/h)	V85 (km/h)	Écart-type (km/h)
90	324	95,13	105,00	10,39
	325	82,54	95,00	14,97
	327	98,91	105,00	11,33
	328	89,72	105,00	13,78
	329	81,56	95,00	11,56
	332	88,91	105,00	13,70
	334	94,88	105,00	11,74
	335	86,89	95,00	9,37
	336	91,08	105,00	11,62
	337	77,17	85,00	11,98
	338	95,44	105,00	10,76
	339	89,19	95,00	10,65
	340	99,34	115,00	12,61
	341	97,25	115,00	15,77

ANNEXE D – CARACTÉRISTIQUES DES SITES DU GROUPE CAS-1

Tableau D.1 : Caractéristiques des sites du groupe cas-1

Variable	Catégorie	Répartition (%)	
		AVEC les augmentations (n=60)	SANS les augmentations (n=49)
Limite de vitesse – <i>Avant</i> (km/h)	50	5,0	-
	70	11,7	4,1
	80	40,0	42,9
	90	43,3	53,1
Limite de vitesse – <i>Après</i> (km/h)	50	15,0	18,4
	70	55,5	65,3
	80	23,3	16,3
	90	6,7	-
Présence d'un terre-plein central	Oui	3,3	4,1
	Non	96,7	95,9
Présence d'un terre-plein latéral	Oui	3,3	4,1
	Non	96,7	95,9
Densité de la population – <i>Avant</i> (milliers d'habitants/km ²)	0 à 0,02	41,7	34,7
	0,02 à 0,04	18,3	20,4
	0,04 à 0,06	13,3	12,2
	0,06 et plus	26,7	32,7
Densité de la population – <i>Après</i> (milliers d'habitants/km ²)	0 à 0,02	43,3	36,7
	0,02 à 0,04	16,7	18,4
	0,04 à 0,06	16,7	16,3
	0,06 et plus	23,3	28,6
Longueur du segment (m)	0 à 1000	71,7	79,6
	1001 à 2000	18,3	14,3
	2000 et plus	10,0	6,1
Distance à la ville-centre la plus proche (km)	0	11,7	10,2
	1 à 20	46,7	49,0
	21 à 60	20,0	18,4
	60 et plus	21,7	22,4
Distance à la RMR/AR la plus proche (km)	0	23,3	24,5
	1 à 20	45,0	44,9
	21 à 60	13,3	12,2
	60 et plus	18,3	18,4
Milieu	Urbain	10,0	8,2
	Périurbain	11,7	14,3
	Rural	78,3	77,6
Classification	Nationale	21,7	20,4
	Régionale	26,7	26,5
	Collectrice	51,7	53,1

Note :

Les onze sites qui ont vu une augmentation de leur limite de vitesse ont été retirés des modèles statistiques

ANNEXE E – MODÈLES STATISTIQUES DU GROUPE CAS-1

A) Modèles au niveau des sites

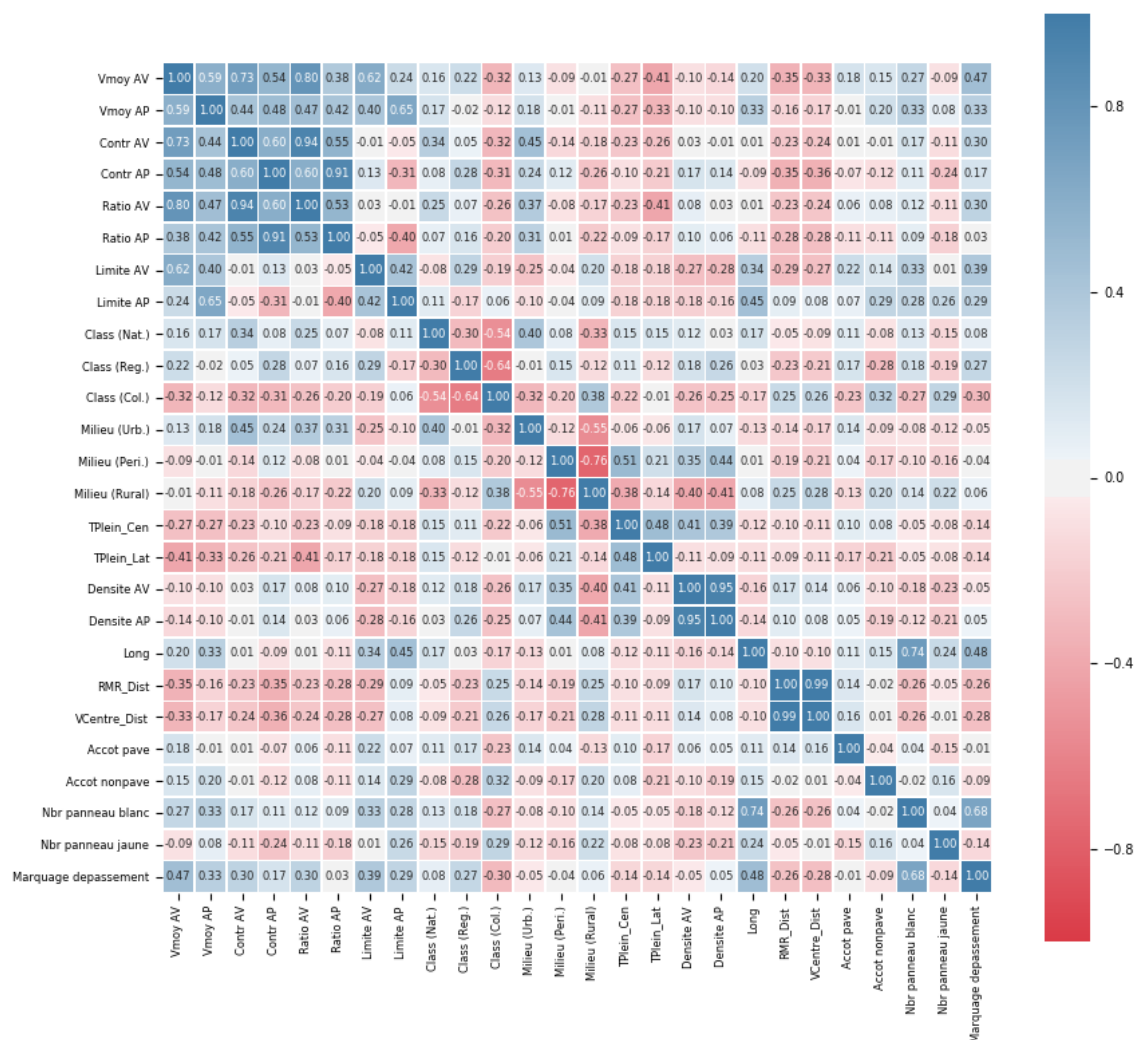


Figure E.1 : Matrice de corrélation au niveau des sites

MODÈLE 1 : $V_{moy\ AP} \sim C(DiffLimite) * Class + V_{moy\ AV} + TPlein_Lat$

Note : Les sites avec des différentiels dans les vitesses pratiquées moyennes inférieures à -25 km/h ont été retirés, car le modèle fait une grande erreur de prédiction sur ces sites.

Dep. Variable:	Vmoy_AP	R-squared:	0.833
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.779
Method:	Least Squares	F-statistic:	15.41
Date:	Tue, 27 Nov 2018	Prob (F-statistic):	3.62e-10
Time:	13:59:51	Log-Likelihood:	-119.08
No. Observations:	46	AIC:	262.2
Df Residuals:	34	BIC:	284.1
Df Model:	11		
Covariance Type:	nonrobust		

	coef	std err	t	P>|t|	[0.025	0.975]
Intercept	10.0561	6.368	1.579	0.124	-2.885	22.997
C(DiffLimite)[T.-30L]	13.5169	3.085	4.381	0.000	7.246	19.787
C(DiffLimite)[T.-20L]	9.6716	2.487	3.888	0.000	4.617	14.726
C(DiffLimite)[T.-10L]	10.2266	2.293	4.459	0.000	5.566	14.887
Class[T.Nationale]	0.1062	1.039	0.102	0.919	-2.004	2.217
Class[T.Regionale]	-7.8518	2.421	-3.243	0.003	-12.772	-2.931
C(DiffLimite)[T.-30L]:Class[T.Nationale]	-7.271e-15	1.78e-15	-4.075	0.000	-1.09e-14	-3.64e-15
C(DiffLimite)[T.-20L]:Class[T.Nationale]	-0.7898	1.734	-0.455	0.652	-4.313	2.734
C(DiffLimite)[T.-10L]:Class[T.Nationale]	0.8960	1.545	0.580	0.566	-2.245	4.037
C(DiffLimite)[T.-30L]:Class[T.Regionale]	-4.0395	4.685	-0.862	0.395	-13.560	5.481
C(DiffLimite)[T.-20L]:Class[T.Regionale]	7.9576	3.017	2.638	0.012	1.827	14.088
C(DiffLimite)[T.-10L]:Class[T.Regionale]	11.5891	3.077	3.766	0.001	5.336	17.842
Vmoy_AV	0.7039	0.089	7.927	0.000	0.523	0.884
TPlein_Lat	-8.3907	3.490	-2.404	0.022	-15.484	-1.298
Marquage_depassement	-1.0759	1.500	-0.717	0.478	-4.124	1.972

Omnibus:	0.971	Durbin-Watson:	2.719
Prob(Omnibus):	0.615	Jarque-Bera (JB):	0.386
Skew:	0.188	Prob(JB):	0.824
Kurtosis:	3.246	Cond. No.	7.24e+18

Warnings:

- [1] Standard Errors assume that the covariance matrix of the errors is correctly specified.
 [2] The smallest eigenvalue is 5.12e-33. This might indicate that there are strong multicollinearity problems or that the design matrix is singular.

Figure E.2 : Résultat du modèle de régression de la vitesse pratiquée moyenne après

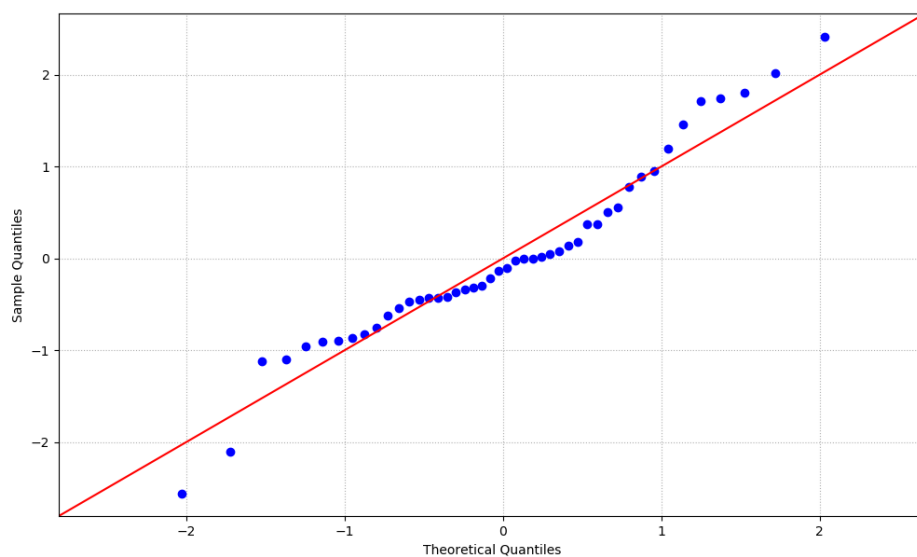


Figure E.3 : Résidus du modèle de régression de la vitesse pratiquée moyenne après

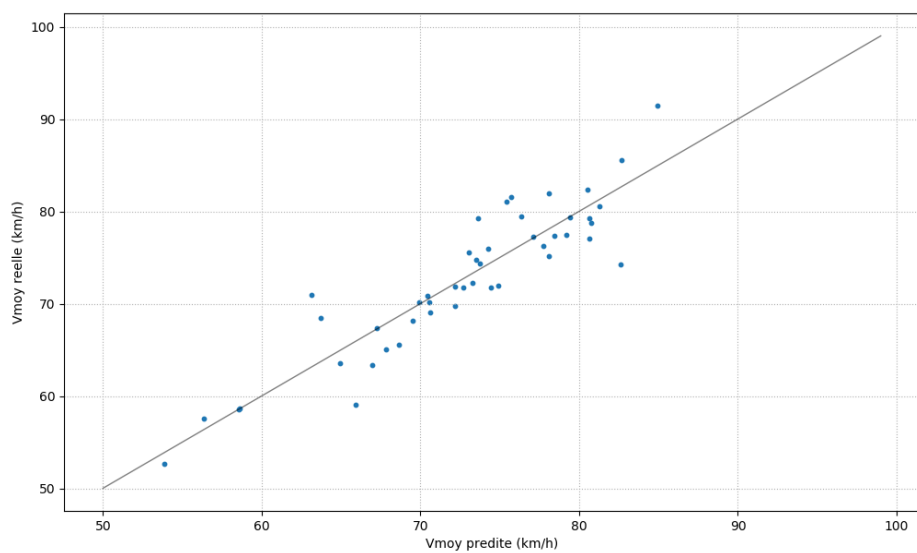


Figure E.4 : Prédiction du modèle de régression de la vitesse pratiquée moyenne après

MODÈLE 2 : DiffRatio ~ C(DiffLimite) + C(Limite_AV)

Note : Les sites ayant une diminution des limites de vitesse de 30 km/h ont été retirés du modèle puisque le modèle fait une grande erreur de prédiction sur ces sites.

OLS Regression Results						
Dep. Variable:	DiffRatio	R-squared:	0.578			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.535			
Method:	Least Squares	F-statistic:	13.68			
Date:	Wed, 14 Nov 2018	Prob (F-statistic):	4.10e-07			
Time:	08:32:45	Log-Likelihood:	69.366			
No. Observations:	45	AIC:	-128.7			
Df Residuals:	40	BIC:	-119.7			
Df Model:	4					
Covariance Type:	nonrobust					
	coef	std err	t	P>|t|	[0.025	0.975]
Intercept	0.3510	0.052	6.734	0.000	0.246	0.456
C(DiffLimite)[T.-20L]	-0.0225	0.035	-0.647	0.522	-0.093	0.048
C(DiffLimite)[T.-10L]	-0.1283	0.037	-3.449	0.001	-0.203	-0.053
C(Limite_AV)[T.80L]	-0.1146	0.048	-2.408	0.021	-0.211	-0.018
C(Limite_AV)[T.90L]	-0.1364	0.041	-3.299	0.002	-0.220	-0.053
Omnibus:	1.198	Durbin-Watson:	2.524			
Prob(Omnibus):	0.549	Jarque-Bera (JB):	0.455			
Skew:	0.124	Prob(JB):	0.797			
Kurtosis:	3.425	Cond. No.	13.2			

Warnings:

[1] Standard Errors assume that the covariance matrix of the errors is correctly specified.

Figure E.5 : Résultats du modèle de régression sur le différentiel du ratio au niveau des sites

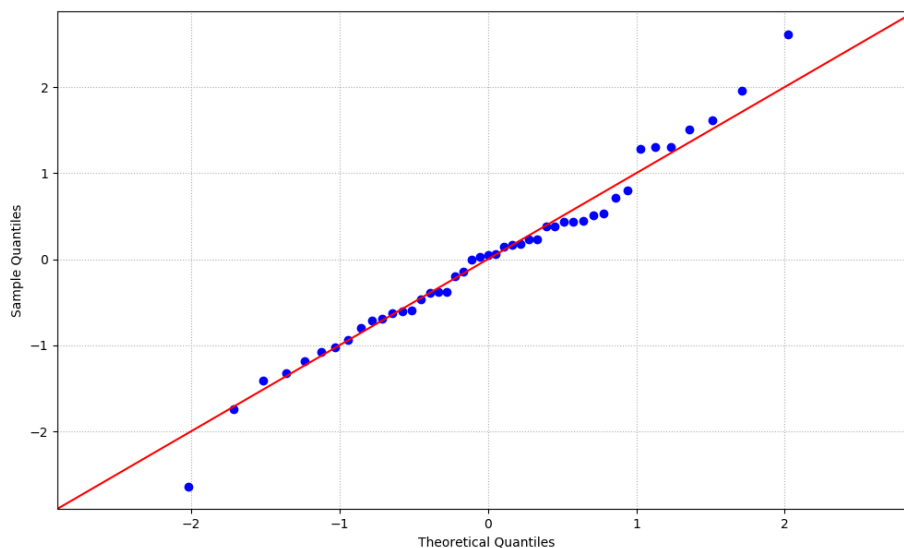


Figure E.6 : Résidus du modèle de régression sur le différentiel du ratio au niveau des sites

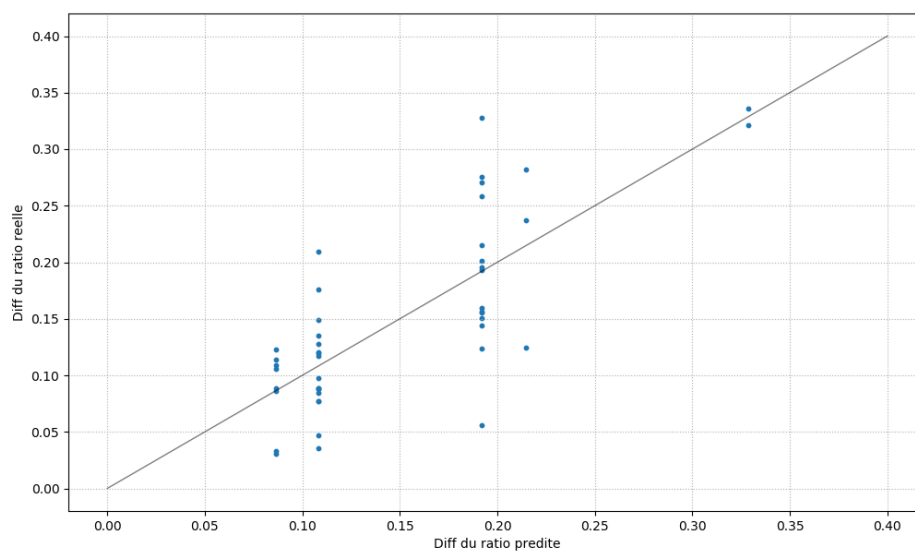


Figure E.7 : Prédiction du modèle de régression sur le différentiel du ratio au niveau des sites

B) Modèles au niveau des sites-relevés

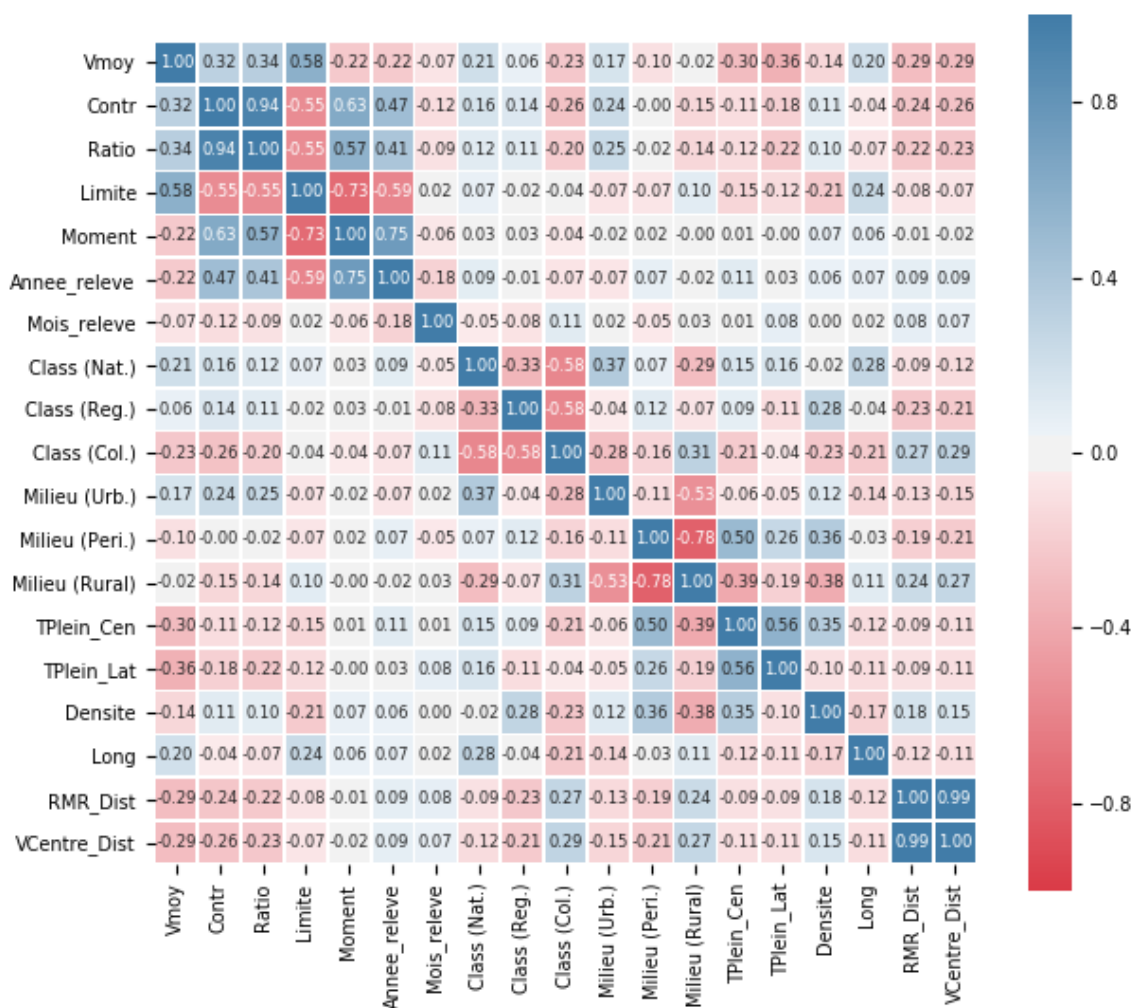


Figure E.8 : Matrice de corrélation au niveau des sites-relevés

MODÈLE 3 : Contr ~ Moment + Limite + Class + TPlein_Lat + Long

Note : Les sites ayant une diminution des limites de vitesse de 30 km/h ont été retirés du modèle puisque le modèle fait une grande erreur de prédiction sur ces sites.

OLS Regression Results						
Dep. Variable:	Contr	R-squared:	0.609			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.602			
Method:	Least Squares	F-statistic:	84.58			
Date:	Tue, 27 Nov 2018	Prob (F-statistic):	1.41e-73			
Time:	14:46:29	Log-Likelihood:	-1649.4			
No. Observations:	388	AIC:	3315.			
Df Residuals:	380	BIC:	3347.			
Df Model:	7					
Covariance Type:	nonrobust					
	coef	std err	t	P>|t|	[0.025	0.975]
Intercept	103.9843	11.680	8.902	0.000	81.018	126.951
Class[T.Nationale]	16.3994	2.285	7.176	0.000	11.906	20.893
Class[T.Regionale]	7.1678	2.220	3.228	0.001	2.802	11.533
TPlein_Lat	-35.8240	4.733	-7.570	0.000	-45.129	-26.519
Long	-0.0065	0.001	-5.479	0.000	-0.009	-0.004
Moment	20.2625	2.782	7.283	0.000	14.792	25.733
Limite	-0.9290	0.139	-6.660	0.000	-1.203	-0.655
Marquage_depassement	14.2436	2.222	6.409	0.000	9.874	18.613
Omnibus:	2.802	Durbin-Watson:	0.676			
Prob(Omnibus):	0.246	Jarque-Bera (JB):	2.560			
Skew:	0.154	Prob(JB):	0.278			
Kurtosis:	3.252	Cond. No.	1.72e+04			
Warnings:						
[1] Standard Errors assume that the covariance matrix of the errors is correctly specified.						
[2] The condition number is large, 1.72e+04. This might indicate that there are strong multicollinearity or other numerical problems.						

Figure E.9 : Résultats du modèle de régression sur le pourcentage de contrevenants au niveau des sites-relevés

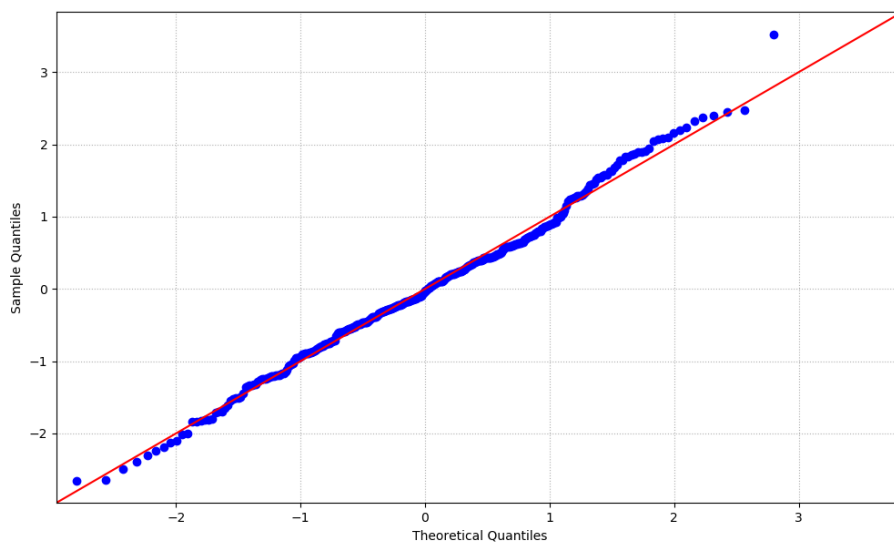


Figure E.10 : Résidus du modèle de régression sur le pourcentage de contrevenants au niveau des sites-relevés

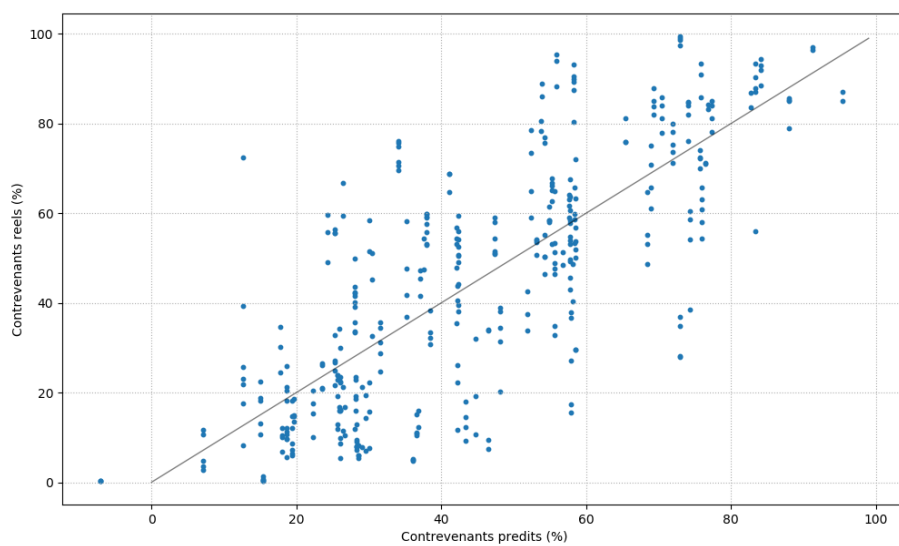


Figure E.11 : Prédiction du modèle de régression sur le pourcentage de contrevenants au niveau des sites-relevés

MODÈLE 4 : Ratio ~ Moment + Limite + Class + TPlein_Lat + Long

Note : Les sites ayant une diminution des limites de vitesse de 30 km/h ont été retirés du modèle puisque le modèle fait une grande erreur de prédiction sur ces sites.

OLS Regression Results						
Dep. Variable:	Ratio	R-squared:	0.589			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.581			
Method:	Least Squares	F-statistic:	77.75			
Date:	Tue, 27 Nov 2018	Prob (F-statistic):	1.89e-69			
Time:	14:48:02	Log-Likelihood:	440.35			
No. Observations:	388	AIC:	-864.7			
Df Residuals:	380	BIC:	-833.0			
Df Model:	7					
Covariance Type:	nonrobust					
	coef	std err	t	P>|t|	[0.025	0.975]
Intercept	1.3475	0.053	25.189	0.000	1.242	1.453
Class[T.Nationale]	0.0652	0.010	6.233	0.000	0.045	0.086
Class[T.Regionale]	0.0243	0.010	2.394	0.017	0.004	0.044
Moment	0.0627	0.013	4.924	0.000	0.038	0.088
Limite	-0.0053	0.001	-8.341	0.000	-0.007	-0.004
TPlein_Lat	-0.2017	0.022	-9.305	0.000	-0.244	-0.159
Long	-2.692e-05	5.42e-06	-4.970	0.000	-3.76e-05	-1.63e-05
Marquage_depassement	0.0563	0.010	5.533	0.000	0.036	0.076
Omnibus:	4.178	Durbin-Watson:	0.599			
Prob(Omnibus):	0.124	Jarque-Bera (JB):	5.196			
Skew:	0.032	Prob(JB):	0.0744			
Kurtosis:	3.563	Cond. No.	1.72e+04			

Warnings:

- [1] Standard Errors assume that the covariance matrix of the errors is correctly specified.
 [2] The condition number is large, 1.72e+04. This might indicate that there are strong multicollinearity or other numerical problems.

Figure E.12 : Résultats du modèle de régression sur le ratio au niveau des sites-relevés

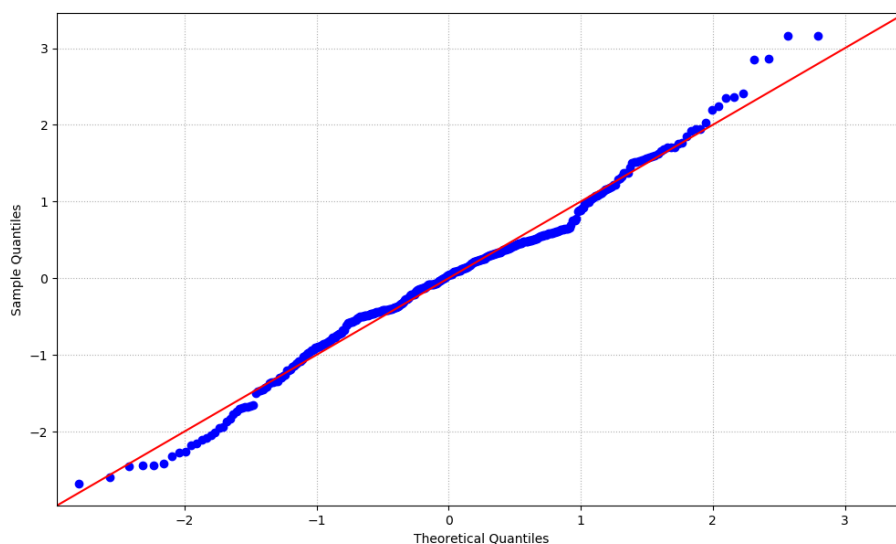


Figure E.13 : Résidus du modèle de régression sur le ratio au niveau des sites-relevés

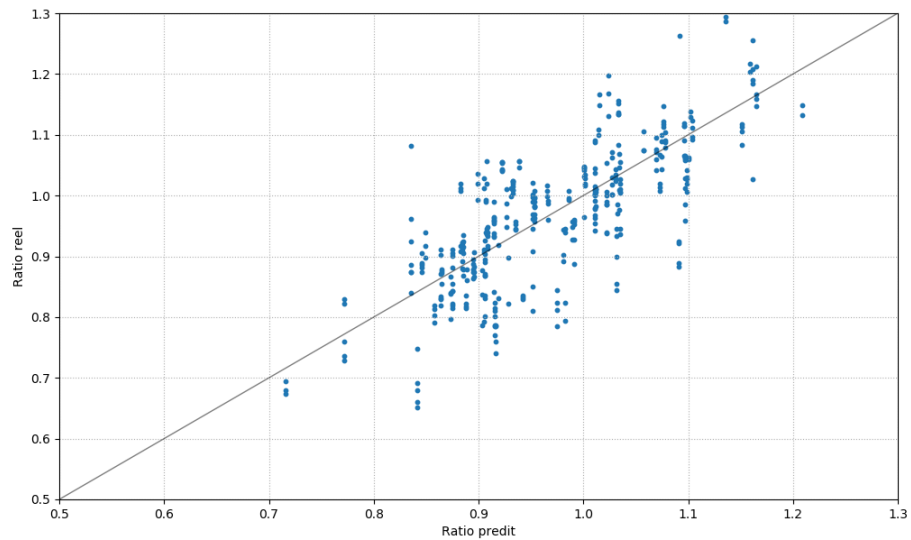


Figure E.14 : Prédiction du modèle de régression sur le ratio au niveau des sites-relevés

ANNEXE F – DISTRIBUTIONS DES VITESSES DES SITES RETIRÉS DU GROUPE CAS-2

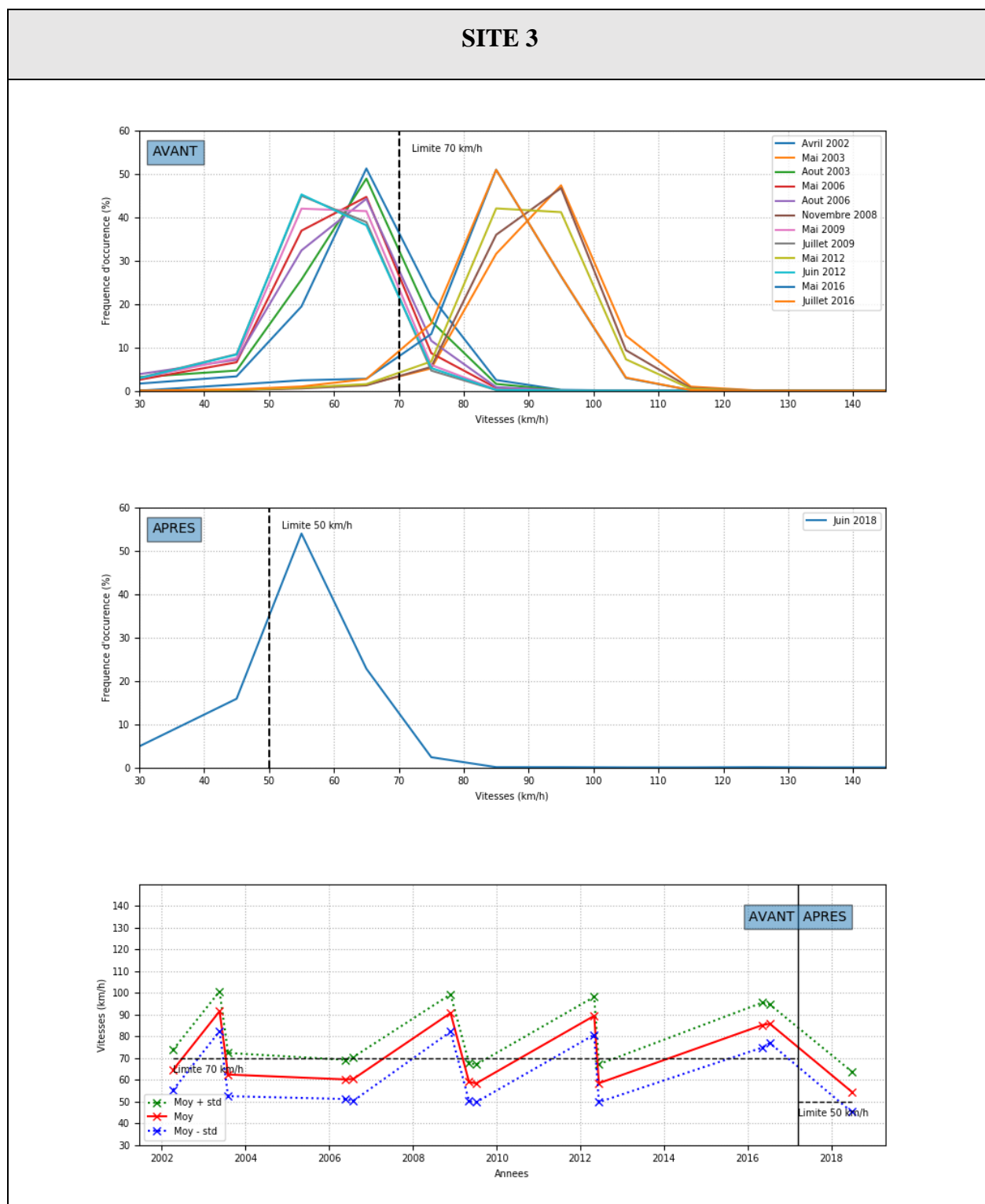


Figure F.1 : Distributions des vitesses pratiquées et vitesse moyenne dans le temps du site 3

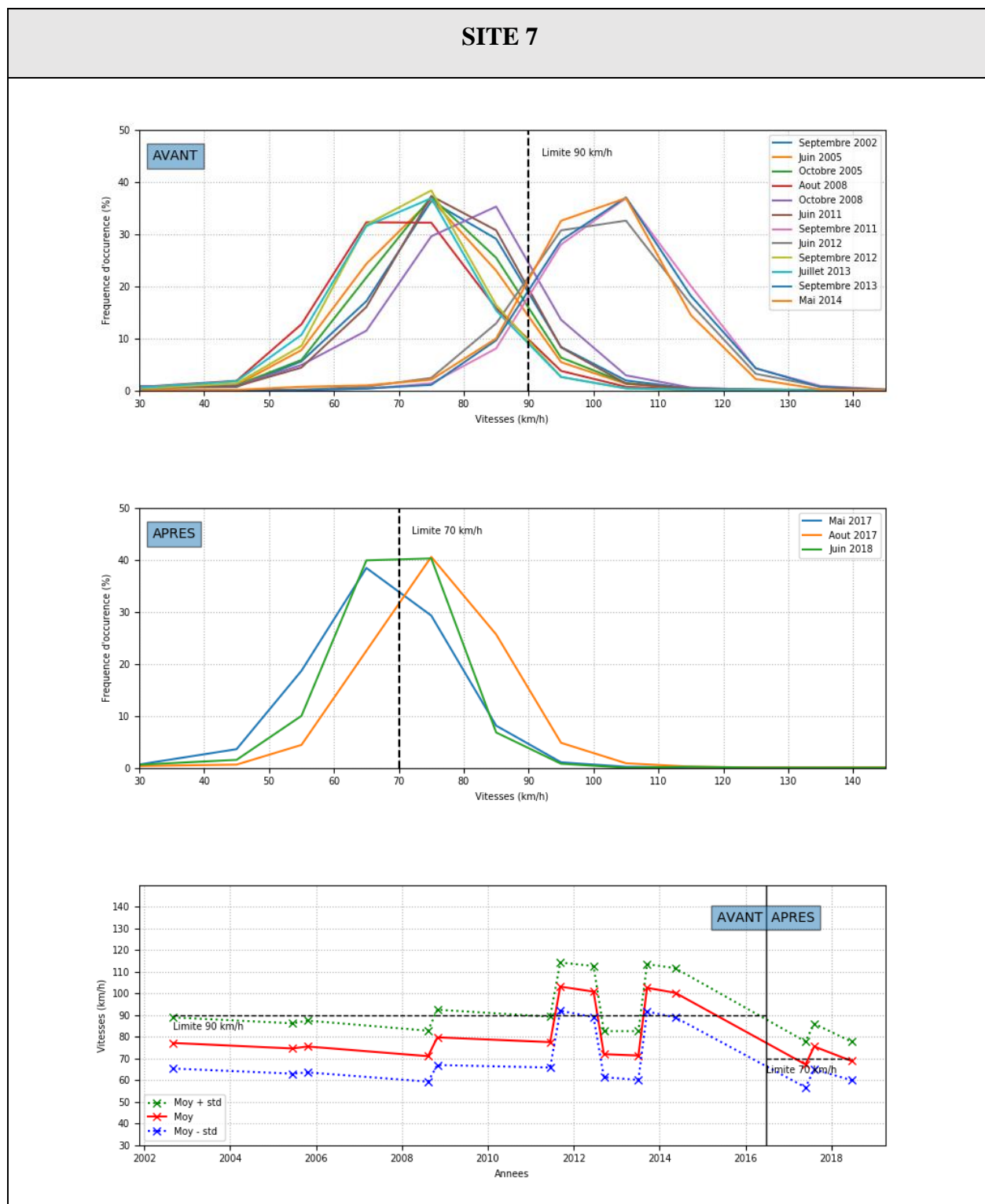


Figure F.2 : Distributions des vitesses pratiquées et vitesse moyenne dans le temps du site 7

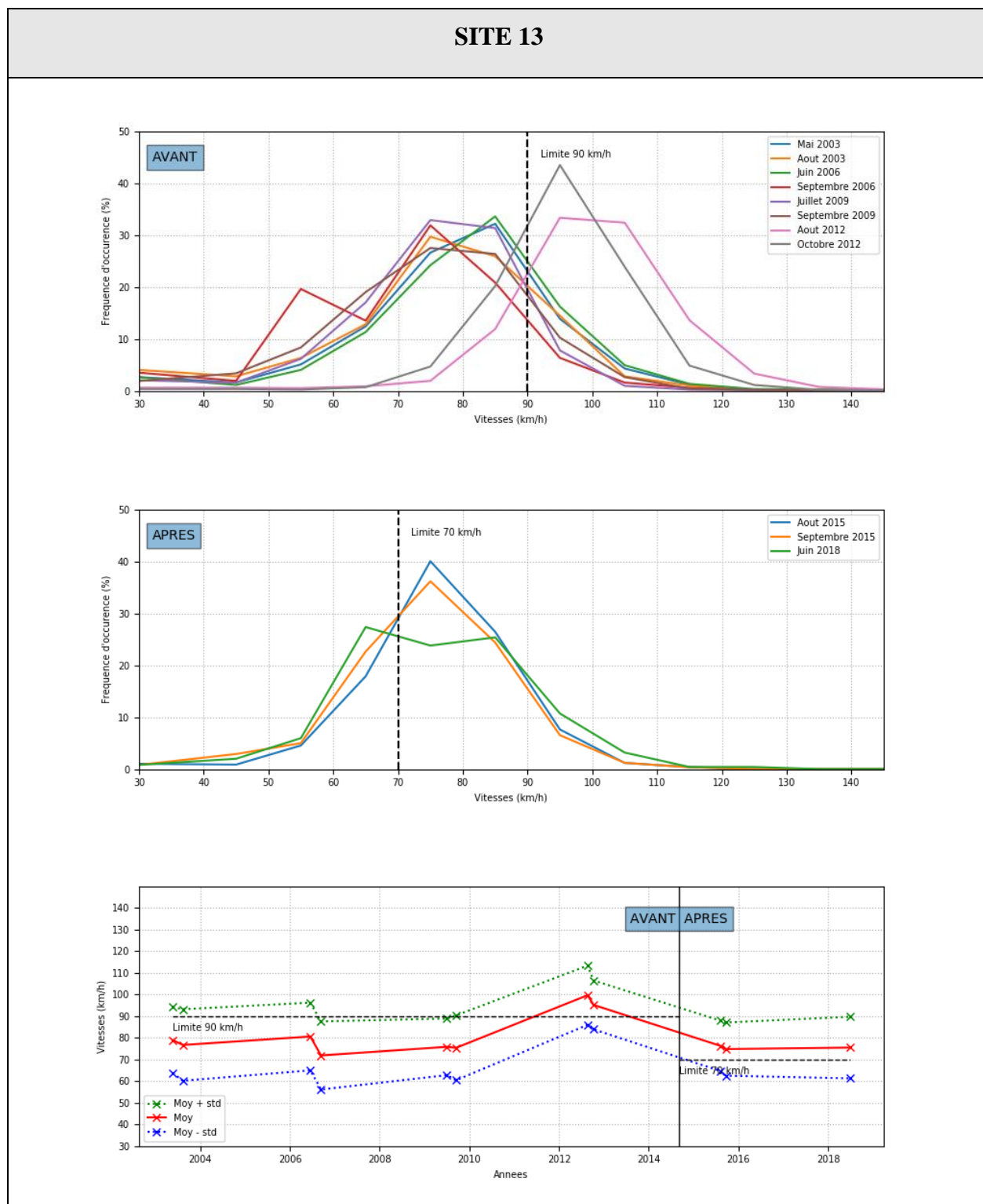


Figure F.3 : Distributions des vitesses pratiquées et vitesse moyenne dans le temps du site 13

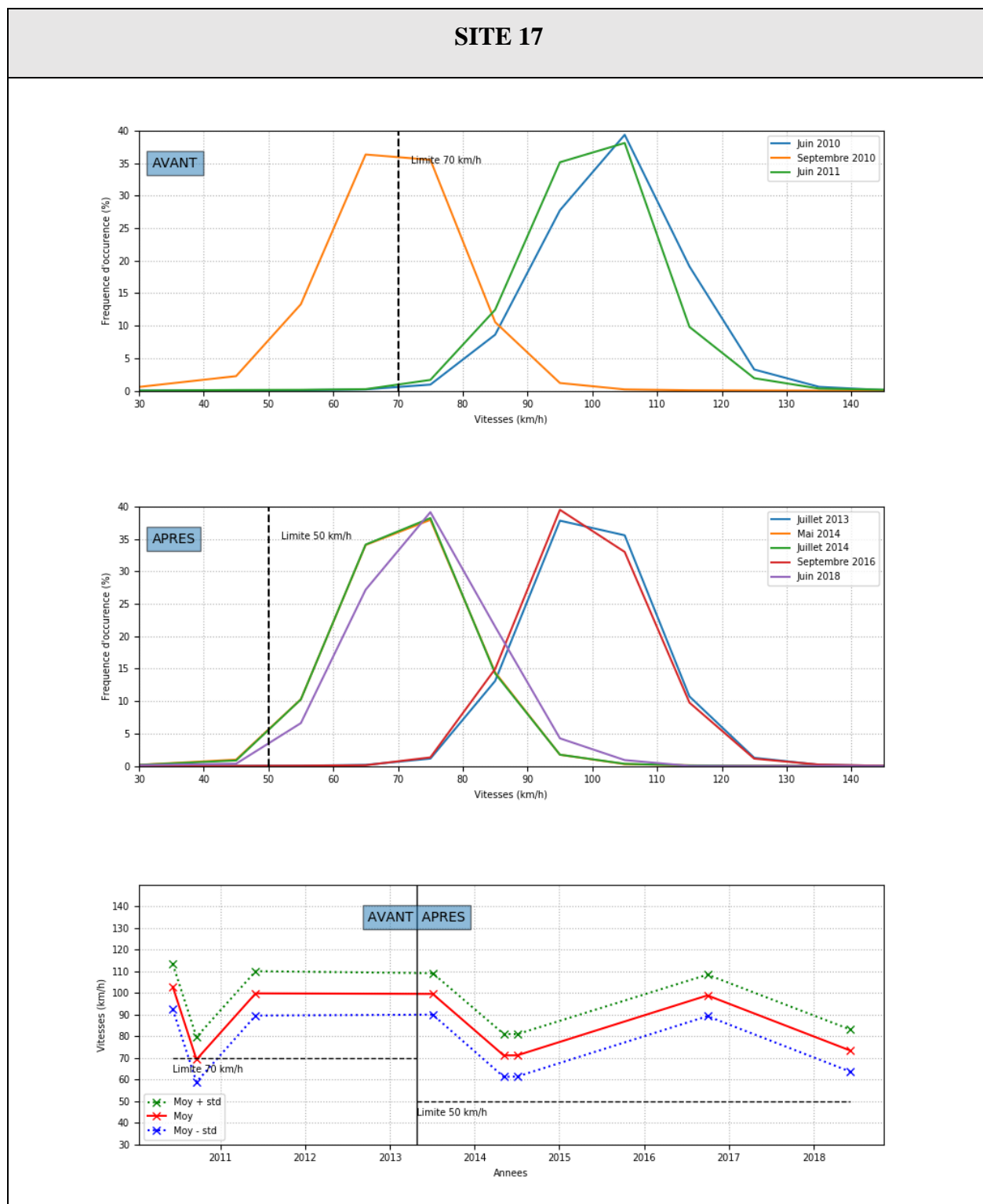


Figure F.4 : Distributions des vitesses pratiquées et vitesse moyenne dans le temps du site 17